工學碩士 學位論文

신항만부지에서의 유동 및 수질에 관한 유한요소해석

Finite Element Analysis of Flow and Water Quality in the New Harbor Site

指導教授 李 重 雨

2002年 2月

韓國海洋大學校 大學院

土 木 環 境 工 學 科

安 鍍 景

Finite Element Analysis of Flow and Water Quality in the New Harbor Site

Do Kyung An

Department of Civil & Environmental Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

Water flow simulations for environmental problems often require local detailed analyses for better understanding and accurate prediction of the fate of pollutant in water bodies. This study deals with the development and application of a two-dimensional flow and dispersion model to the coastal water area to find out possible changes due to the wide port development plan. The model uses finite element theory and the Galerkin weighted-residual approach as its basis. As far as the spatial discretization is concerned, the finite element method is attractive because of its flexibility and ability to naturally treat complex coastal geometries.

The water area is discretized into linear, triangular elements. Boundary conditions of the Dirichlet and Neumann type are applied. A third type(Robin) boundary condition can be applied where river flow exits along the coastline. In order to describe long and relatively slow transients, such as those related to pollutant dispersion, the use of

explicit two-step time stepping methods is introduced into the model formulation.

Two submodels, the flow induced circulation model and pollutant dispersion model, are tested by comparing with the analytical solution in a rectangular harbor where its analytical solutions are known. The tested results are of well agreement with the analytical solutions. The model is applied to Busan New Harbor area to simulate circulation and pollutant dispersion in terms of construction steps for coastal dikes. Effects of the sequential construction coastal dikes which change coastline configurations and separation of water bodies are necessary to be investigated and predicted in terms of flow and water quality.

Results from the model were compared with the measured water level and flows in four stations. The flow pattern by the model shows to be similar to the observed data away from the construction site where the flow is not affected. From the simulation results, it is concluded that the model may be useful for numerous other studies for planning and management purposes, especially flow and pollution dispersion in the coastal water bodies where the flow is so complicated.

目 次

LIST OF TABLES

LIST OF FIGURES

NOMENCLATURE

a_A , a_B , a_P	Amplitudes of tide level at stations A, B and P
C	Depth averaged concentration
C_h	Chezy coefficient
H	Total water level
K	Non dimensional coefficient of surface force
K_1	Lunar-solar diurnal constituent of tide
M_2	Principal lunar semidiurnal constituent of tide
O_1	Principal lunar diurnal constituent of tide
P	Pressure
S	Material discharge rate of per unit time
S_2	Principal solar semidiurnal constituent of tide
T	Tidal period
U, V	Flow velocity components in horizontal direction
U_a, V_a	Node value of velocities in horizontal direction
V_n	Velocity component of normal direction to the boundary
V_s	Velocity component of tangential direction to the boundary
$\overline{V_n}$	A mean velocity component of normal direction to the boundary

W	Wind velocity
ω_E	Anglular velocity of the earth
fv, fu	Coriolis parameters in x and y direction
g	Gravitational acceleration
h	Mean water depth at (x, y)
k	Effective diffusion coefficient
n_x, n_y	Manning coefficient for roughness
t	Charateristic time
Δt	Time increment
u, v, w	Velocities of x, y, z direction
ν_ε	Eddy dynamic viscous coefficient
x, y, z	Horizontal and vertical coordinate system
$d\Gamma$	Segment boundary
Γ_c	Fixed boundary of concentration
Γ_q	Fixed boundary of mass flux
Γ_v	Shore boundary
Γ_ζ	Open boundary
Δ^e	Area of triangle finite element
$\Delta\sigma_{xx}$, $\Delta\sigma_{yy}$, $\Delta\sigma_{xy}$, $\Delta\sigma_{yx}$	Stress increment
Φ_a	1-dimensional interpolation function
ϕ	Angle between wind and x_axis
Ω	Total water domain

$d\Omega$	Segment of domain
δ	Weight funtion
ε	Selective lumping coefficient
ζ	Water surface elevation
ζ_a	Node value of water surface elevation
$\bar{\zeta}$	Fixed water surface elevation
θ	Angle between s and x_axis
μ_ε	Eddy viscous coefficient
ρ	Seawater density
σ_{xx}, σ_{xx}, σ_{xy}, σ_{yx}	Stress components
φ	Phase of tide level

1. 서론

1.1 연구의 배경

연안역은 바다와 육지가 만나는 경계역이며 이질적인 생태계 사이에 에너지의 흐름과 물질의 순환이 매우 활발하게 일어나는 곳이다. 연안역은 수산생물의 산란장이나 서식지로서 매우 중요하며, 생산력이 높아 보전할 가치가 매우 높은 생태계이다. 아울러 연안역은 사회경제적인 측면에서도 매우 중요한 장소이다. 연안역에는 도시가 발달하고 인구가 집중되게 마련이며, 항만, 공단 등 경제활동의 중심지로서 뿐만 아니라 관광과 레저활동이 이루어지는 휴양지로서의 기능도 가지고 있다.

최근 해양개발에 대한 관심이 고조됨과 더불어 다양한 형태의 해양개발에 따른 지속적인 해양환경의 부정적인 변화가 국제사회의 커다란 관심사로 떠오르고 있다. 해양환경에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 인위적인 인자들 중, 인간의 생산 및 소비활동에서 발생하는 각종 폐기물의 해양유입은 해양을 황폐화시키는 핵심 요소로 인식된다(Coe & Rogers, 1996).

바다는 육상 오폐수의 유입, 준설과 매립, 해양투기, 잦은 기름 유출사고 등으로 연안에서부터 서서히 생명력을 잃어 가고 있다. 외해와 잘 섞이지 않는 내만이나 항만에서부터 오염의 영향은 차츰 가시화되어져 가고 있고, 한계를 넘는 과도한 오염부하로 연안해역은 몸살을 앓고 있는 실정이다. 특히 대규모 건설사업으로 인하여 연안의 물리적 특성 변화와 오염물의 이동 및 분포형태가 달라지므로 유기물의 침전현상이 촉진되어 인근 생태계의 악화를 초래하게 되었다. 악화되고 있는 해양환경을 보존하기 위해서는 오염원이 발생하는 수역에 대한 수질감시와 다양한 공학적 방법에 의한 수질 예측 및 제어가 요구된다.

수질예측은 오염원이 발생한 지점에서 시간이 경과함에 따라 얼마만큼의 양이 어느 정도의 거리까지 확산되는지를 알아야 가능하다.

1.2 연구의 목적

2000년대 항만 물동량의 원활한 처리를 위한 항만시설의 확충 시급과 세계해운의 주 항로에 인접한 부산 가덕도 일원을 21세기를 대비한 동북아 국제물류 중심항만(Hub Port)으로 육성하기 위하여 신항만 공사가 추진되고 있다.

이러한 항만 개발시 반폐쇄성 해역인 연안역의 해양환경에 크고 작은 악영향이 예상된다. 그 영향을 최소화하기 위해 지속적이고 철저한 사후환경영향조사를 통하여 우발적으로 일어날 수 있는 사고에 대비하고 있다. 이와 같은 대책에도 불구하고 나타나는 불가피한 해양환경상의 영향 중 하나는 개발 과정 중 해안에 발생하는 부유토사 확산에 따른 부유물질 농도 증가이다. 특히, 신항만 개발에서는 전체적 항만계획에 따라 공사를 수행하도록 하고 이와 관련한 실험 과정을 통해 환경적 영향을 분석하여 실시설계를 하였다. 그러나 사회환경에 따라 공정과 공사계획이 수정되는 예상치 못한 상황이 발생하기도 한다.

본 연구는 연안역에서 야기되는 물리적 현상의 변화를 수치모델을 통하여 추정하는데 목표를 두고, 대규모 연안역 개발에 따른 개발 진행과정에 변화하는 유동장을 각 공사 단계별로 유동장을 분석하여, 각 공사시 진척도에 따른 오염물질의 거동분석에 연구의 주안점을 두었다. 심화되는 연안역 개발에 따른 항내 또는 연안역에서의 확산분포는 많은 연구가 시행되고 있으며, 계속 개발되어가고 있는 실정이나 연안역의 수질 변화에 대한 사전 예측자료는 미비한 실증이다. 따라서 본 연구를 통하여 연안역의 단계적 개발로 인한 연안역의 오염확산분포 변화를 추정하여 앞으로 계속 실시될 사업에 대해 기초적

인 자료를 제시함과 동시에 연안 장래 생태계와 수질오염을 효율적으로 관리할 수 있는 근거를 제공하고자 한다.

1.3 연구의 내용 및 방법

수질예측은 오염물질이 방류된 지점에서 시간이 경과함에 따라 얼마만큼의 양이 어느 정도의 거리까지 확산되는지를 알아야 가능하다. 이러한 예측을 위해서는 동수력학적인 유체의 흐름에 관한 지식과 오염물질들의 다양한 변화과정에 대한 이해가 필수적이다. 지금까지 오염물질의 수계내 확산과정은 주로 현장에서 직접 조사된 자료를 이용하거나 수리모델에 의한 실험결과를 이용하여 해석하여 왔다. 근래에는 수치해석 기법을 이용한 해석방법이 많이 이용되고 있다. 수치모델을 이용한 연안역에서의 수질연구로는 국내의 경우, 김 외(1985), 이 외(1984), 최(1999) 등에 의해 조석에 따른 수질변화와 조류에 의한 확산이 연구되었으며, 환경처(1993, 1994) 및 한국수자원공사(1994) 등에서 수질개선대책 및 예측기술을 연구하였다. 외국의 경우 Thomman(1964), Leendertse(1967, 1971), Fischer(1972), Orlob(1971), Masch(1971) 등에 의해 흐름과 수질을 설명하기 위한 1, 2차원 정상상태모델이 개발 및 연구되고 있다. 연안부근의 흐름을 지배하는 요인으로서는 조석에 의한 조류와 바람에 의한 취송류로 분류할 수 있다. 조류 등과 같이 주기가 긴 장파에 의한 연안해역에서의 흐름은 수평스케일이 연직스케일에 비해 상당히 크기 때문에 연직방향으로 수심평균한 평면 2차원 흐름으로 평가한다. 그러나, 일반적으로 수평흐름은 수심에 따라 변하며, 특히 기름, 토사 등과 같은 물질 확산 또는 해수교환을 예측하는 경우, 수심에 따른 수평흐름을 정확히 평가해야 한다.

본 연구의 모델은 수심 평균 2차원 해수유동모델과 확산모델을 이용하여 해수유동과 이류 및 확산현상에 의한 오염물질의 분포를 가덕도 신항만을 대상

으로 수심 평균된 2차원 해수 유동모델을 적용하여 해수유동 현상을 파악하고, 그 결과를 2차원 확산모델에 도입하여 오염물질의 분포를 계산하고자 한다.

해수유동 모델은 수심자료 및 조석자료를 이용하여 x, y 방향의 유속과 조위를 계산하며, 확산모델은 해수유동모델에서 계산된 유속과 유향을 이용하여 오염물질의 시간 경과에 따른 분포를 계산함으로서 오염물질의 확산을 예측하고자한다. 이러한 예측에 적용할 수치해석적 기법은 유한요소법(FEM, Finite Element Method)을 적용하기로 한다.

해수유동과 확산현상을 해석하는 수치해법으로는 유한차분법(FDM, Finite Difference Method)과 유한요소법을 많이 사용한다. 종래, 수치해석 수법은 대부분 유한차분법이 많이 이용되었다. 유한요소법은 근년이 되어서 급격히 발전한 해석수법이다. 차분법이 미분을 차분으로 치환한다고 하는 직접적인 근사의 방법을 이용하는데 반해서, 유한요소법은 다소 번거로운 간접적인 근사의 방법을 취한다. 이 때문에 유한요소법은 매우 큰 오차를 불러들일 단점이 있다. 그러나, 불규칙적인 대상에 근사화가 가능하고, 요소의 격자 조정이 용이, 복합적인 경계조건에 쉽게 적용된다는 장점으로 최근 King(1965), Norton (1973), Kang et al. (1986, 1989), Kang(1988) 등이 사용하고 있다. 대상영역을 미세영역으로 세분화 하는 관점에서는 유한요소법이 복잡한 해안선을 유연하고 자연스럽게 처리할 수 있기 때문에 많은 애호를 받고 있다. 이러한 유한요소법의 장점과 연구의 필요성으로 인하여 본 연구에서도 유한요소법을 사용하여 수치모델을 구성한다. 아울러 비교적 느리고 장주기의 유동과 확산문제의 특성으로 인해 2단계 시간의존 양적해법(explicit two-step time stepping method)을 도입하기로 한다.

2. 천수역에서의 흐름해석

2.1 흐름의 지배방정식

천이수역에의 입자의 운동은, Fig.2.1에 나타난 것과 같이 수면으로부터 수저까지, 거의 일정한 수평운동을 한다. 물입자의 연직방향의 운동을 무시할 수 있는 경우가 많다.

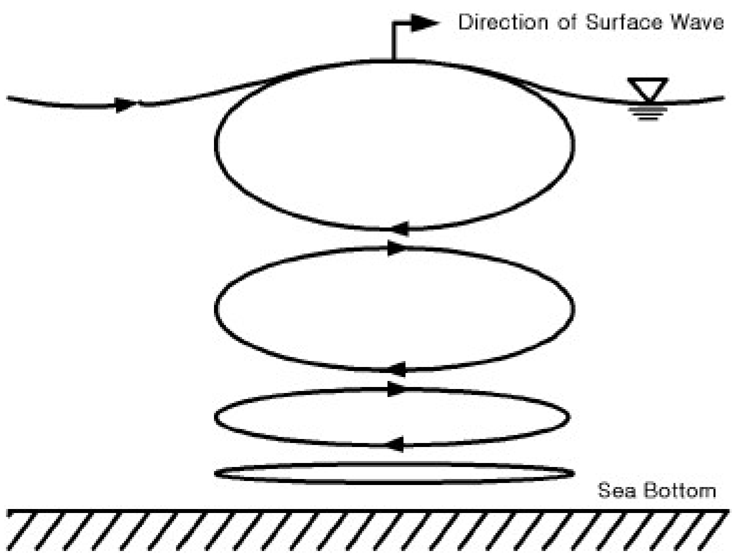


Fig.2.1 Oscillation of water particle at shallow water

수중을 전파하는 음의 속도는 대략 1500m/s 이고, 우리가 고려하고자 하는 유체의 속도는 기껏해야 수십 m/sec 정도인 아주 느린 흐름이다. 이때에, 유체는 비압축성이라 가정하는 것이 바람직하다. 또한 대상으로 하는 물의 흐름이 일어나고 있는 영역이 연해역 또는 호소내 라고 해도 지구의 크기에 비하여 국부적이기 때문에 지구표면의 곡률을 고려할 필요는 없고, 평면으로 취급하는 것으로 한다.

이와 같은 흐름을 지배하는 방정식은, 식(2.1) (2.4)의 연속방정식과 운동방정식으로 구성된다. 즉, 3차원 직교좌표를 이용하고, 그 원점을 수면의 1점에 고정한다. 수면상에 각각의 x축을 동쪽 방향, y축을 북쪽 방향, z축을 연직 상방향으로 한다. 유체의 밀도 $\rho(kg/m^3)$가 일정하다고 가정하고, u, v, w를 각각 x축, y축, z축 방향의 유속성분(m/s), p를 압력(pa)이라 한다.

● 연속방정식

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{2.1}$$

● 운동방정식

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = fv + \frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{xz}}{\partial z} \tag{2.2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -fu + \frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{yz}}{\partial z} \tag{2.3}$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\rho g + \frac{\partial s_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial s_{zz}}{\partial z} \tag{2.4}$$

여기에서, f는 코리올리의 인자라 하고, 지구의 자전에 의하여 지구상의 수평운동(x,y)에 대하여 직각(v,-u)으로 작용하는 힘에 비례하는 정수이며, 지구자전의 각속도를 $\omega_E(=7.292*10^{-5}rad/sec)$위도를 ϕ(rad) 라고 하면, f= $2\omega_E \sin\phi$로 얻을 수 있다. 또, g는 중력가속도(=9.81 m/s^2)이다. μ는 유체의 점성계수 (Pa・s) 이다. 이상의 방정식을 연립시하여 경계조건과 초기조건으로 해를 정한다. Fig.2.2와 같은 직교좌표계(x, y, z)를 고려한다. 평균 해면 상에, 각각 x축을 동쪽으로, y축을 북쪽으로 취하고, z축을 연직 상방향에 둔다.

z=0의 평면은 평균해면이라 한다. h(x, y)는 평균해면으로부터 해저까지의

수심(m)을 가리킨다.

● 응력성분

$$
\begin{aligned}
s_{xx} &= -p + \mu \frac{\partial u}{\partial x} \\
s_{yy} &= -p + \mu \frac{\partial v}{\partial y}, \quad s_{zz} = -p + \mu \frac{\partial w}{\partial z} \\
s_{xy} &= s_{yx} = \frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right) \\
s_{xz} &= s_{zx} = \frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right), \quad s_{yz} = s_{xy} = \frac{\mu}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)
\end{aligned}
\tag{2.5}
$$

ζ (x, y, t)는 조위(m)로, 평균해면으로부터 해면까지의 연직변위이다. 전수심을 H=h+ζ로 둔다.

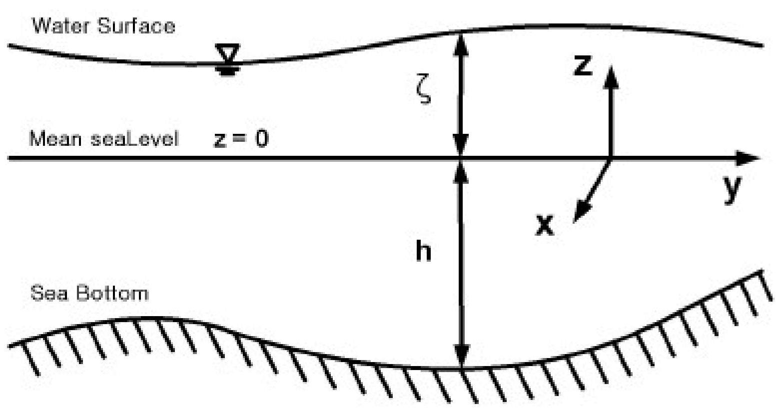


Fig.2.2 Coordinate system for shallow water wave

해수의 밀도 $\rho(kg/m^3)$는 일정하다. u, v는 각각 동쪽 및 북쪽방향의 유속성분(m/s) 이다. u, v를 연직방향으로 평균을 취한 것을 각각 U,V(m/s)로 한다.

● x, y방향의 유속성분

$$U(x, y, t) = \frac{1}{H}\int_{-h}^{\zeta} u(x, y, z, t)\,dz \qquad (2.6)$$

$$V(x, y, t) = \frac{1}{H}\int_{-h}^{\zeta} v(x, y, z, t)\,dz \qquad (2.7)$$

● 연속방정식

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \qquad (2.8)$$

H=ζ+h이고, h는 시간에 의존하지 않기 때문에, 식 (2.8)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \qquad (2.9)$$

● x축 방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} &\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} - fV + g\frac{\partial\zeta}{\partial x} \\ &= \frac{1}{\rho H}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(H\sigma_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\sigma_{xy})\right\} + \frac{KW^2}{H}\cos\phi - g\frac{U\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \end{aligned} \qquad (2.10)$$

● y축 방향의 운동방정식

$$\begin{aligned} &\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + fU + g\frac{\partial\zeta}{\partial y} \\ &= \frac{1}{\rho H}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(H\sigma_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\sigma_{yy})\right\} + \frac{KW^2}{H}\sin\phi - g\frac{V\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \end{aligned} \qquad (2.11)$$

● 응력성분(Pa)

$$\sigma_{xx} = \frac{\mu_\varepsilon}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x}\right), \qquad \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \frac{\mu_\varepsilon}{2}\left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right)$$
$$\sigma_{yy} = \frac{\mu_\varepsilon}{2}\left(\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}\right) \tag{2.12}$$

여기에, K = **수면을 부는 바람에 의하여 발생하는 표면력의 무차원계수**

W = **바람의 속도**(m/s)

ψ = **바람의 방향이** x**축**(**동방향**)**과 이룬 각**(rad)

μ_ε= **와점성계수**(Pa・s)

C_h = Chezy**계수** ($m^{1/2}/s$), [$C_h = \frac{1}{n} h^{1/6}$]

n = **해저마찰을 나타내는** Manning**의 조도계수이다**.

식(2.11) **과 식**(2.12)**의 우변 제**1**항을 변형하면**,

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} - fV + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{1}{\rho H}\left\{\frac{\partial H}{\partial x}\sigma_{xx} + \frac{\partial H}{\partial y}\sigma_{xy}\right\}$$
$$+ \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{KW^2}{H}\cos\psi - g\frac{U\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \tag{2.13}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + fU + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} = \frac{1}{\rho H}\left\{\frac{\partial H}{\partial x}\sigma_{yx} + \frac{\partial H}{\partial y}\sigma_{yy}\right\}$$
$$+ \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{KW^2}{H}\sin\psi - g\frac{V\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \tag{2.14}$$

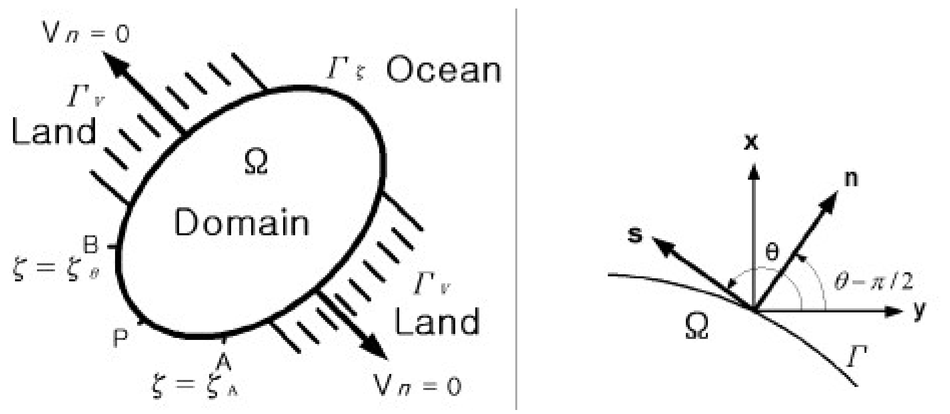
식(2.13)**과 식**(2.14)**의 우변의 제**1**항은 다른 항에 비하여 일반적으로 작기 때문에 무시하는 것으로 한다**. **따라서 운동방정식은 다음과 같이 정리할 수 있다**.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} - fV + g\frac{\partial \zeta}{\partial x}$$
$$= \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y}\right) + \frac{KW^2}{H}\cos\phi - g\frac{U\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \tag{2.15}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + fU + g\frac{\partial \zeta}{\partial y}$$
$$= \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{KW^2}{H}\sin\phi - g\frac{V\sqrt{(U^2+V^2)}}{HC_h^2} \tag{2.16}$$

2.2 경계 조건

Fig.2.3(a)와 같이 계산해역을 Ω로 하고, 그 육지경계를 Γ_V, 해상경계를 Γ_ζ로 한다.



(a) Global coordinate (b) Local coordinate

Fig.2.3 Schematic description of boundary conditions

경계에 세운 외향의 단위 법선의 x, y 성분을 n_x, n_y라 한다

● **경계조건**

$$\begin{aligned}
&Un_x + Vn_y = \overline{V}_n \qquad at \quad \Gamma_v(shore\ \ boundary) \\
&\zeta = \overline{\zeta} \qquad\qquad\qquad at \quad \Gamma_\zeta(open\ \ boundary) \\
&\sigma_{xx} n_x + \sigma_{xy} n_y = \overline{\tau}_x \\
&\sigma_{yx} n_x + \sigma_{yy} n_y = \overline{\tau}_y
\end{aligned} \tag{2.17}$$

여기에, $\overline{V}_n$(m/s) = **법선 유속성분**

$\overline{\zeta}$(m) = **조위**

$\overline{\tau}_x, \overline{\tau}_y$ (Pa) = **표면력의** x, y **성분은 알고 있는 것으로 한다.**

육지경계 Γ_V**에서는** $\overline{V}_n = 0$**을 얻는다. 이것을 유속성분** U, V **에 대입하기 위해,** Γ_V**사이의 법선** n **과 접선** s **방향에** Fig.2.3(b)**와 같은 국소좌표**(n, s)**를 고려한다. 이때, 일단 구하고자 하는 유속의** x, y **성분** U, V **와** n, s **성분** V_n, V_s**사이에는 다음 식이 성립한다.**

$$\begin{pmatrix} V_n \\ V_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta, & -\cos\theta \\ \cos\theta, & \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} \tag{2.18}$$

단, 이를 변환하면, θ**는 접선** s **가** x **축과 이루는 각**(rad)**이다.** U, V **에 관해 풀면 다음과 같다.**

$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin\theta, & \cos\theta \\ -\cos\theta, & \sin\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_n \\ V_s \end{pmatrix} \tag{2.19}$$

$\overline{V}_n = 0$**에 의해,** Γ_V **에서의 유속을 수정하여 다음과 같이 나타난다.**

$$U = V_s \cos\theta, \quad V = V_s \sin\theta \tag{2.20}$$

또한, Γ_V**가 유입하천부가 되면**, V_n**가 알 수 있는 값이 되고**, $V_s = 0$**의 경우에는 식**(2.19)**에 의해**, **다음과 같이 수정된다**.

$$\begin{aligned} U &= V_n \sin\theta \\ V &= -V_n \cos\theta \end{aligned} \tag{2.21}$$

해상경계 Γ_ζ **에서는 통상**, **강제수위** $\bar{\zeta}$**를 부가하고**, $\tau_x = \tau_y = 0$**로 한다**. **이제**, **경계** Γ_ζ**가 직선** AB**의 부분이 되고**, **경계점** P**가** AB **사이에 있는 것으로 한다**. 2**점** A, B**에서 얻어진 조위기록** $\zeta_A(t), \zeta_B(t)$**은 진폭을** a(m), **주기를** T = 12 + $\frac{5}{12}$(hr), **위상을** ϕ(hr) **로 하여 다음 식을 얻는다**.

$$\begin{aligned} \zeta_A(t) &= a_A \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t - \phi_A)\right\} \\ \zeta_B(t) &= a_B \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t - \phi_B)\right\} \end{aligned} \tag{2.22}$$

점 P**에서의 조위** $\zeta(t)$**는 진폭** a_A, a_B **위상** ϕ_A, ϕ_B**를** AP, PB**의 길이에 비례배분해서 진폭** a_P, **위상** ϕ_P**를 이용하여 다음과 같이 정리한다**.

$$\zeta_p(t) = a_p \sin\left\{\frac{2\pi}{T}(t - \phi_p)\right\} \tag{2.23}$$

본래의 계산대상이 되는 해상은 비교적 좁은 영역이 있지만, **이 경계조건이**

얻어지지 않는 경우, 작은 영역(협역)을 포함한 넓은 영역(광역)에서 먼저 계산을 행하고 그 계산결과로부터 작은 영역의 해상 경계 절점에서 얻은 계산치를 뽑아 내는 이른바 zooming 기법을 이용한다. 계산에서 이미 찾아진 작은 영역의 경계 절점에서의 조위를 퓨리에 급수 변환에 의해 근사하고, 이것을 작은 영역의 새로운 경계치로 부가하게 된다.

초기 조건은 일반적으로 정해지지 않기 때문에, 계산개시 때에는 영역 Ω내에서 다음과 같이 둔다.

$$t=0 \text{ 일때 } \zeta=0,\quad U=V=0 \tag{2.24}$$

2.3 테일러법에 의한 이산화

시간증분을 Δt로 할 때, Taylor의 정리에 의해

$$U(x,y,t+\Delta t)=U(x,y,t)+\Delta t\frac{\partial U}{\partial t}(x,y,t)+\frac{\Delta t^2}{2}\frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(x,y,t)+O(\Delta t^3) \tag{2.25}$$

시간스텝 $t_{n+1}=t_n+\Delta t \quad (n=0,1,$ 에서) 양변을 Δt로 나누고, 고차의 항 $O(\Delta t^2)$을 무시한 다음의 근사의 공식을 고려한다.

$$\frac{U^{n+1}(x,y)-U^n(x,y)}{\Delta t}=\frac{\partial U^n}{\partial t}(x,y)+\frac{\Delta t}{2}\frac{\partial^2 U^n}{\partial t^2}(x,y) \tag{2.26}$$

$$\frac{V^{n+1}(x,y)-V^n(x,y)}{\Delta t}=\frac{\partial V^n}{\partial t}(x,y)+\frac{\Delta t}{2}\frac{\partial^2 V^n}{\partial t^2}(x,y) \tag{2.27}$$

먼저, 연속방정식 식(2.9)을 풀어쓰면

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} U + \frac{\partial H}{\partial y} V + H\left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y}\right) = 0 \tag{2.28}$$

이산화 과정에서는, **이 방정식의** 1**항부터** 3**항까지를 무시하여**,

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{2.29}$$

로 둔다. **다음에**, **식**(2.15)**과 식**(2.16)**의 운동방정식 중 관성항만을 고려하여**

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} = 0 \tag{2.30}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} = 0 \tag{2.31}$$

로 둔다. **식**(2.29)**에 의해**

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(U^2) + \frac{\partial}{\partial y}(UV) = 0 \tag{2.32}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(UV) + \frac{\partial}{\partial y}(V^2) = 0 \tag{2.33}$$

로 고쳐진다. **이 때**, **시간에 관한** 2**차 도함수는 식**(2.32)**과 식**(2.33)**을 이항하고** t**에 관하여 미분하면 다음과 같이 된다**.

x **방향** :

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t}\left\{-\frac{\partial}{\partial x}(U^2)-\frac{\partial}{\partial y}(UV)\right\} \\
&= -\frac{\partial}{\partial x}\left(2U\frac{\partial U}{\partial t}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial U}{\partial t}V+U\frac{\partial V}{\partial t}\right) \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left\{2U\left(U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{\left(U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}\right)V+U\left(U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}\right)\right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left(2U^2\frac{\partial U}{\partial x}+2UV\frac{\partial U}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left\{UV\left(\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}\right)+V^2\frac{\partial U}{\partial y}+U^2\frac{\partial V}{\partial x}\right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left(2U^2\frac{\partial U}{\partial x}+2UV\frac{\partial U}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(2V^2\frac{\partial U}{\partial y}+U^2\frac{\partial V}{\partial x}\right)
\end{aligned}
\tag{2.34}
$$

y **방향** :

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial^2 V}{\partial t^2} &= \frac{\partial}{\partial t}\left\{-\frac{\partial}{\partial x}(UV)-\frac{\partial}{\partial y}(V^2)\right\} \\
&= -\frac{\partial}{\partial x}\left(V\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial t}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(2V\frac{\partial V}{\partial t}\right) \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left\{\left(U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{2U}{\partial y}\right)V+U\left(U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}\right)\right\}+\frac{\partial}{\partial y}\left\{2V\left(U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}\right)\right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left\{UV\left(\frac{\partial V}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}\right)+\left(U^2\frac{\partial V}{\partial x}+V^2\frac{\partial U}{\partial y}\right)\right\}+\left\{\frac{\partial}{\partial y}\left(2UV\frac{\partial V}{\partial x}+2V^2\frac{\partial V}{\partial y}\right)\right\} \\
&= \frac{\partial}{\partial x}\left(U^2\frac{\partial V}{\partial x}+V^2\frac{\partial U}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(2UV\frac{\partial V}{\partial x}+2V^2\frac{\partial V}{\partial y}\right)
\end{aligned}
\tag{2.35}
$$

식(2.26) **및 식**(2.27)**을 이용하여 식**(2.15) **및 식**(2.16)**의 운동방정식을 시간에 관해 다음과 같이 이산화 한다**.

$$
\begin{aligned}
&\frac{U^{n+1}-U^n}{\Delta t}-\frac{\Delta t}{2}\frac{\partial^2 U^n}{\partial t^2}+U^n\frac{\partial U^n}{\partial x}+V^n\frac{\partial U^n}{\partial y}-fV^n+g\frac{\partial \zeta^n}{\partial x} \\
&\quad = \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma_{xx}^n}{\partial x}+\frac{\partial \sigma_{xy}^n}{\partial y}\right)+\frac{K\,W^{n2}}{H^n}\cos\phi-g\frac{U^n\sqrt{(U^{n2}+V^{n2})}}{H^n C_h^2}
\end{aligned}
\tag{2.36}
$$

$$\frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2}\frac{\partial^2 V^n}{\partial t^2} + U^n \frac{\partial V^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial V^n}{\partial y} - f U^n + g \frac{\partial \zeta^n}{\partial y}$$
$$= \frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \sigma^n_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma^n_{yy}}{\partial y}\right) + \frac{K W^{n2}}{H^n}\sin\psi - g\frac{V^n\sqrt{(U^{n2} + V^{n2})}}{H^n C_h^2} \tag{2.37}$$

식(2.34) 및 식(2.35)에 의해 다음의 이산화 된 방정식이 얻어진다.

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial U^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial U^n}{\partial y} - f V^n + g \frac{\partial \zeta^n}{\partial x}$$
$$= \frac{1}{\rho}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\sigma^n_{xx} + \Delta\sigma^n_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma^n_{xy} + \Delta\sigma^n_{xy})\right\} + \frac{K W^{n2}}{H^n}\cos\psi - g\frac{U^n\sqrt{(U^{n2} + V^{n2})}}{H^n C_h^2} \tag{2.38}$$

$$\frac{V^{n+1} - V^n}{\Delta t} + U^n \frac{\partial V^n}{\partial x} + V^n \frac{\partial V^n}{\partial y} - f U^n + g \frac{\partial \zeta^n}{\partial y}$$
$$= \frac{1}{\rho}\left\{\frac{\partial}{\partial x}(\sigma^n_{yx} + \Delta\sigma^n_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y}(\sigma^n_{yy} + \Delta\sigma^n_{yy})\right\} + \frac{K W^{n2}}{H^n}\sin\psi - g\frac{V^n\sqrt{(U^{n2} + V^{n2})}}{H^n C_h^2} \tag{2.39}$$

여기에, 이산화시킨 응력의 증분은 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{xx} = \frac{\Delta t}{2}\rho\left(2U^2\frac{\partial U}{\partial x} + 2UV\frac{\partial U}{\partial y}\right) \tag{2.40}$$

$$\Delta\sigma_{xy} = \Delta\sigma_{yx} = \frac{\Delta t}{2}\rho\left(V^2\frac{\partial U}{\partial y} + U^2\frac{\partial V}{\partial x}\right) \tag{2.41}$$

$$\Delta\sigma_{yy} = \frac{\Delta t}{2}\rho\left(2UV\frac{\partial V}{\partial x} + 2V^2\frac{\partial V}{\partial y}\right) \tag{2.42}$$

이상으로, 새로운 응력은 식(2.43) 식(2.45)로 된다.

$$\hat{\sigma}_{xx} := \sigma_{xx} + \Delta\sigma_{xx} = \frac{1}{2}\left\{2\mu_\varepsilon + \Delta t\rho V^2)\frac{\partial U}{\partial x} + 2\Delta t\rho UV\frac{\partial U}{\partial y}\right\} \tag{2.43}$$

$$\hat{\sigma}_{xy} = \hat{\sigma}_{yx} := \sigma_{xy} + \Delta\sigma_{xy}$$
$$= \sigma_{yx} + \Delta\sigma_{yx} = \frac{1}{2}\left\{(\mu_\varepsilon + \Delta t\rho V^2)\frac{\partial U}{\partial y} + (\mu_\varepsilon + \Delta t\rho U^2)\frac{\partial V}{\partial x}\right\} \tag{2.44}$$

$$\hat{\sigma}_{yy} := \sigma_{yy} + \Delta\sigma_{yy} = \frac{1}{2}\left\{2\Delta t\rho UV\frac{\partial V}{\partial x} + 2(\mu_\varepsilon + \Delta t\rho V^2)\frac{\partial V}{\partial y}\right\} \tag{2.45}$$

2.4 유한요소법에 의한 이산화

해상경계 Γ_ζ 상에서 $\delta\zeta = 0$로 되는 것과 같이 임의의 가중함수 $\delta\zeta$를 고려하고, 시간에 관하여 이산화된 연속방정식 식(2.8)의 양변에 곱하여, 영역 Ω로 적분한다. n스텝째의 표시를 생략하여 이를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\int_\Omega \delta\zeta \frac{\zeta^{n+1} - \zeta}{\Delta t} d\Omega + \int_\Omega \delta\zeta\left(\frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y}\right) d\Omega = 0 \tag{2.46}$$

여기에서, $d\Omega = dx\,dy$이며, Gauss의 발산정리에 의해

$$\int_\Omega \delta\zeta \frac{\zeta^{n+1} - \zeta}{\Delta t} d\Omega + \int_\Gamma \delta\zeta H(Un_x + Vn_y)\, d\Gamma - \int_\Omega H\left(\frac{\partial\delta\zeta}{\partial x}U + \frac{\partial\delta\zeta}{\partial y}V\right) d\Omega = 0 \tag{2.47}$$

$d\Gamma$는 경계 Γ상에서 적분하는 것을 의미한다. 경계조건을 고려하여

$$\int_\Omega \delta\zeta \frac{\zeta^{n+1} - \zeta}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Gamma_V} \delta\zeta V_n\, d\Gamma - \int_\Omega H\left(\frac{\partial\delta\zeta}{\partial x}U + \frac{\partial\delta\zeta}{\partial y}V\right) d\Omega = 0 \tag{2.48}$$

육지경계 Γ_V상에서 $\delta U = 0,\ \delta V = 0$로 되는 것과 같이 임의의 가중함수,

δU, δV를 운동방정식(2.38) 및 식(2.39)의 양변에 곱하여, 영역 Ω로 적분하면 다음과 같다.

$$\int_\Omega \delta U \frac{U^{n+1} - U}{\Delta t} d\Omega + \int_\Omega \delta U \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta U f V d\Omega + g \int_\Omega \delta U \frac{\partial \zeta}{\partial x} d\Omega$$
$$- \frac{1}{\rho} \int_\Omega \delta U \left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\sigma}_{xy}}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta U \frac{K W^2}{H} \cos \psi d\Omega + g \int_\Omega \delta U \frac{U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0 \qquad (2.49)$$

$$\int_\Omega \delta V \frac{V^{n+1} - V}{\Delta t} d\Omega + \int_\Omega \delta U \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta V f U d\Omega + g \int_\Omega \delta V \frac{\partial \zeta}{\partial y} d\Omega$$
$$- \frac{1}{\rho} \int_\Omega \delta V \left(\frac{\partial \hat{\sigma}_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \hat{\sigma}_{yy}}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta V \frac{K W^2}{H} \sin \psi d\Omega + g \int_\Omega \delta V \frac{V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0 \qquad (2.50)$$

식(2.49)및 식(2.50)의 제 5항에 Gauss-Green의 정리를 적용시켜 부분적분을 하면 다음과 같다.

$$\int_\Omega \delta U \frac{U^{n+1} - U}{\Delta t} d\Omega + \int_\Omega \delta U \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta U f V d\Omega + g \int_\Omega \delta U \frac{\partial \zeta}{\partial x} d\Omega$$
$$- \frac{1}{\rho} \int_\Gamma \delta U (\hat{\sigma}_{xx} n_x + \hat{\sigma}_{xy} n_y) d\Gamma + \frac{1}{\rho} \int_\Omega \left\{ \frac{\partial \delta U}{\partial x} \hat{\sigma}_{xx} + \frac{\partial \delta U}{\partial y} \hat{\sigma}_{xy} \right\} d\Omega \qquad (2.51)$$
$$- \int_\Omega \delta U \frac{K W^2}{H} \cos \psi d\Omega + g \int_\Omega \delta U \frac{U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0$$

$$\int_\Omega \delta V \frac{V^{n+1} - V}{\Delta t} d\Omega + \int_\Omega \delta V \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) d\Omega - \int_\Omega \delta V f U d\Omega + g \int_\Omega \delta V \frac{\partial \zeta}{\partial y} d\Omega$$
$$- \frac{1}{\rho} \int_\Gamma \delta V (\hat{\sigma}_{yx} n_x + \hat{\sigma}_{yy} n_y) d\Gamma + \frac{1}{\rho} \int_\Omega \left\{ \frac{\partial \delta V}{\partial x} \hat{\sigma}_{yx} + \frac{\partial \delta V}{\partial y} \hat{\sigma}_{yy} \right\} d\Omega \qquad (2.52)$$
$$- \int_\Omega \delta V \frac{K W^2}{H} \cos \psi d\Omega + g \int_\Omega \delta V \frac{V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0$$

경계조건을 고려하면, 식(2.51) 및 식(2.52)의 제 5항, Γ에 관한 적분항은 0이 된다. 따라서, 가중잔차방정식은 다음식으로 성립한다.

$$
\begin{aligned}
&\int_{\Omega} \delta U \frac{U^{n+1} - U}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta U \left(U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} \right) d\Omega \\
&- \int_{\Omega} \delta U f V d\Omega + g \int_{\Omega} \delta U \frac{\partial \zeta}{\partial x} d\Omega + \int_{\Omega} \left\{ (\nu_{\varepsilon} + \Delta t U^2) \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial x} \right. \\
&+ \Delta t U V \frac{\partial \delta U}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t V^2) \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial y} \\
&\left. + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t U^2) \frac{\partial \delta U}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \right\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta U \frac{K W^2}{H} \cos \phi d\Omega \\
&+ g \int_{\Omega} \delta U \frac{U \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0
\end{aligned}
\tag{2.53}
$$

$$
\begin{aligned}
&\int_{\Omega} \delta V \frac{V^{n+1} - V}{\Delta t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta V \left(U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} \right) d\Omega + \int_{\Omega} \delta V f U d\Omega \\
&+ g \int_{\Omega} \delta V \frac{\partial \zeta}{\partial y} d\Omega + \int_{\Omega} \left\{ \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t V^2) \frac{\partial \delta V}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \right. \\
&+ \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t U^2) \frac{\partial \delta V}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial x + \Delta t U V} \frac{\partial \delta V}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} \\
&\left. + (\nu_{\varepsilon} + \Delta t V^2) \frac{\partial \delta V}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial y} \right\} d\Omega - \int_{\Omega} \delta V \frac{K W^2}{H} \sin \phi d\Omega \\
&+ g \int_{\Omega} \delta V \frac{V \sqrt{(U^2 + V^2)}}{H C_h^2} d\Omega = 0
\end{aligned}
\tag{2.54}
$$

여기에서, 와동점성계수 (m^2/s)을 $\nu_{\varepsilon} = \mu_{\varepsilon}/\rho$로 둔다.

영역 Ω를 Fig.2.4와 같이 삼각형의 유한요소로 분할하고, 미지조위 ζ와, 미지유속 U, V와 이들의 가중함수 $\delta\zeta$, δU, δV를 다음과 같이 근사한다.

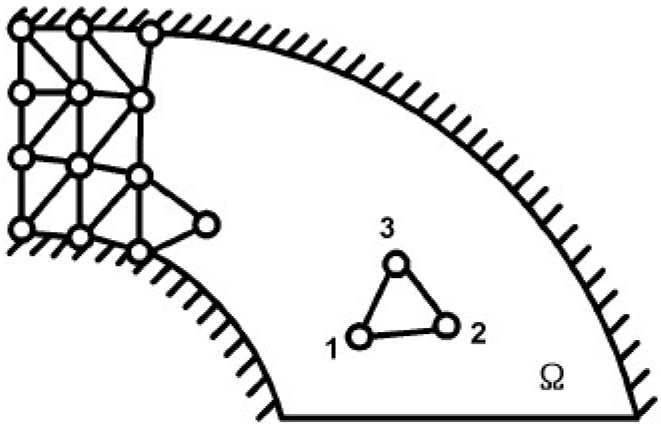


Fig.2.4 Partition of the domain by triangular finite elements

$$
\begin{aligned}
&\zeta = \sum_\alpha \phi_\alpha \zeta_\alpha, \quad \delta\zeta = \sum_\alpha \phi_\alpha \delta\zeta_{\alpha,} \\
&U = \sum_\alpha \phi_\alpha U_\alpha, \quad \delta U = \sum_\alpha \phi_\alpha \delta U_{\alpha,} \\
&U = \sum_\alpha \phi_\alpha V_\alpha, \quad \delta V = \sum_\alpha \phi_\alpha \delta V_\alpha
\end{aligned}
\tag{2.55}
$$

여기에서, $\phi_\alpha(\alpha = 1,2,3)$**는 식** (2.56)**과 같은 삼각형 유한요소** e **에서의** 1**차의 보간 함수이다**.

$$\phi_\alpha = \frac{1}{2\Delta^e}(a_\alpha + b_\alpha x + c_\alpha y) \tag{2.56}$$

Δ^e**는 삼각형 유한요소의 면적이고**, ζ_α, U_α, V**는 절점 값이다**.
요소내의 변수를 면적좌표에 의한 1**차 보간 함수를 이용하여 근사하면**, **요소의** e**에서 행렬성분은 다음과 같은 식으로 정리 할 수 있다**.

$$M^e_{\alpha\beta} = \int_e \phi_\alpha \phi_\beta d\Omega = \frac{\Delta^e}{12}(1+\delta_{\alpha\beta}) \tag{2.57a}$$

$$X^e_{\alpha\beta\gamma} = \int_e \phi_\alpha \phi_\beta \frac{\partial \phi_\gamma}{\partial x} d\Omega = \frac{b_\gamma}{24}(1+\delta_{\alpha\beta}) \tag{2.57b}$$

$$Y^e_{\alpha\beta\gamma} = \int_e \phi_\alpha \phi_\beta \frac{\partial \phi_\gamma}{\partial y} d\Omega = \frac{c_\gamma}{24}(1+\delta_{\alpha\beta}) \tag{2.57c}$$

$$\begin{aligned} N^e_{\alpha\beta\gamma} &= \int_e \phi_\alpha \phi_\beta \phi_\gamma d\Omega \\ &= \frac{\Delta^e}{60} \begin{array}{c} \\ (\beta) \\ \\ \end{array} \begin{array}{c} (\gamma) \\ \left|\begin{matrix} 6 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 1 \\ 2 & 1 & 2 \end{matrix}\right| \\ (\alpha=1) \end{array}, \begin{array}{c} \\ \left|\begin{matrix} 2 & 2 & 1 \\ 2 & 6 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \end{matrix}\right| \\ (\alpha=2) \end{array}, \begin{array}{c} \\ \left|\begin{matrix} 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 6 \end{matrix}\right| \\ (\alpha=3) \end{array}, \end{aligned} \tag{2.57d}$$

$$P^e_{\alpha\beta} = \int_e \phi_\alpha \frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{b_\beta}{6} \tag{2.57e}$$

$$Q^e_{\alpha\beta} = \int_e \phi_\alpha \frac{\partial \phi_\beta}{\partial y} d\Omega = \frac{c_\beta}{6} \tag{2.57f}$$

$$D^e_{\alpha\beta} = \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x}\frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{b_\alpha b_\beta}{4\Delta^e} \tag{2.57g}$$

$$E^e_{\alpha\beta} = \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x}\frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{b_\alpha c_\beta}{4\Delta^e} \tag{2.57h}$$

$$F^e_{\alpha\beta} = \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x}\frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{c_\alpha b_\beta}{4\Delta^e} \tag{2.57i}$$

$$G^e_{\alpha\beta} = \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x}\frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{c_\alpha c_\beta}{4\Delta^e} \tag{2.57j}$$

이러한 식(2.57)**을 식**(2.46), **식**(2.53), **식**(2.54)**에 대입하면**, $\sigma\zeta_\alpha$, σU_α, σV_α ($\alpha=1, 2, 3$)**이 임의로 되는 것에 의해**, **다음의 요소방정식이 얻어진다**.

$$\begin{aligned} \sum_\beta M^e_{\alpha\beta} \frac{\zeta^{n+1}_\beta - \zeta_\beta}{\Delta t} &+ \sum_{\beta,\gamma} X^e_{\alpha\beta\gamma} U_\beta H_\gamma + \sum_{\beta,\gamma} Y^e_{\alpha\beta\gamma} V_\beta H_\gamma \\ &+ \sum_{\beta,\gamma} X^e_{\alpha\gamma\beta} H_\gamma U_\beta + \sum_{\beta,\gamma} Y^e_{\alpha\gamma\beta} H_\gamma V_\beta = 0 \end{aligned} \tag{2.58}$$

$$
\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} \frac{U^{n+1}_{\beta} - U_{\beta}}{\varDelta t} \quad & + \sum_{\beta,\gamma} X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U_{\beta} U_{\gamma} + \sum_{\beta,\gamma} Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V_{\beta} U_{\gamma} \\
& - \sum_{\beta,\gamma} N^{e}_{\alpha\beta\gamma} f_{\beta} V_{\gamma} + g \sum_{\beta} P^{e}_{\alpha\beta} \zeta_{\beta} \\
& + (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t U^{2}_{e}) \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} + \varDelta t U_{e} V_{e} \sum_{\beta} E^{e}_{\alpha\beta} U_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t V^{2}_{e}) \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} U_{\beta} + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t U^{2}_{e}) \sum_{\beta} F^{e}_{\alpha\beta} V_{\beta} \\
& - \left[\frac{K W^{2}}{H} \cos\psi \right]^{e} \frac{\varDelta^{e}}{3} \\
& + g \left[\frac{\sqrt{(U^{2} + V^{2})}}{H C^{2}_{h}} \right]^{e} \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} U_{\beta} = 0
\end{aligned}
\tag{2.59}
$$

$$
\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} \frac{V^{n+1}_{\beta} - V}{\varDelta t} \quad & + \sum_{\beta,\gamma} X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U_{\beta} V_{\gamma} + \sum_{\beta,\gamma} Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V_{\beta} V_{\gamma} \\
& - \sum_{\beta,\gamma} N^{e}_{\alpha\beta\gamma} f_{\beta} U_{\gamma} + g \sum_{\beta} Q^{e}_{\alpha\beta} \zeta_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t V^{2}_{e}) \sum_{\beta} E^{e}_{\alpha\beta} U_{\beta} + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t U^{2}_{e}) \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} V_{\beta} \\
& + \varDelta t U_{e} V_{e} \sum_{\beta} F^{e}_{\alpha\beta} V_{\beta} + (\nu_{\varepsilon} + \varDelta t V^{2}_{e}) \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} V_{\beta} \\
& - \left[\frac{K W^{2}}{H} \sin\psi \right]^{e} \frac{\varDelta^{e}}{3} \\
& + g \left[\frac{\sqrt{(U^{2} + V^{2})}}{H C^{2}_{h}} \right]^{e} \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} V_{\beta} = 0
\end{aligned}
\tag{2.60}
$$

이것을 모든 요소에 적용하여 합치면, 영역전체에서의 유한요소방정식이 얻어진다.

2.5 계산 해법

이산화하기 위한 시간 스텝 $t_{n+1} = t_n + \Delta t \quad (n = 0, 1,$에서$)$ 주어진 n과 n+1사이에, 또한 $n + \frac{1}{2}$의 스텝을 둔다. 미지의 조위 ζ에 대하여 다음과 같이 근사식을 구성한다.

1 단계

$$\zeta^{n+1/2} = \zeta^n + \frac{\Delta t}{2}\frac{\partial \zeta^n}{\partial t} + O(\Delta t^2) \tag{2.61}$$

2 단계

$$\zeta^{n+1} = \zeta^n + \Delta t \frac{\partial \zeta^{n+1/2}}{\partial t} + O(\Delta t^3) \tag{2.62}$$

식(2.61)를 식(2.62)에 대입하면,

$$\zeta^{n+1} = \zeta^n + \Delta t \frac{\partial \zeta^n}{\partial t} + \frac{\Delta t^2}{2}\frac{\partial^2 \zeta^n}{\partial t^2} + O(\Delta t^3) \tag{2.63}$$

로 되고, ζ^{n+1}의 테일러 전개로 $O(\Delta t^3)$의 항을 절단한 식이 된다. 2계 미분의 $\partial^2 \zeta / \partial t^2$ 은 실제에는 계산하지 않는다. 이와 같이 2단계 양적 해법을 이용하는 것에 의해 1계미분 $\partial \zeta / \partial t$ 만을 계산하는 것만으로 2차의 정도를 가지는 것이 가능하다. 식(2.61) 및 식(2.62)을 식(2.58) 식(2.60)에 적용하면,

1**단계**:

$$\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}\zeta^{n+1/2}_{\beta} = \sum_{\beta} M^{2}_{\alpha\beta}\zeta^{n}_{\beta} - \frac{\Delta t}{2}\left\{\sum_{\beta,\gamma}(X^{e}_{\alpha\beta\gamma}U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma}V^{n}_{\beta})H^{n}_{\gamma} + \sum_{\beta,\gamma}(X^{e}_{\alpha\beta\gamma}U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma}V^{n}_{\beta})H^{n}_{\gamma}\right\} \tag{2.64}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}U^{n+1/2}_{\beta} = & \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta} - \frac{\Delta t}{2}\left\{\sum_{\beta,\gamma}(X^{e}_{\alpha\beta\gamma}U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma}V^{n}_{\beta})\,U^{n}_{\gamma} - \sum_{\beta,\gamma}N^{e}_{\alpha\beta\gamma}f_{\beta}V^{n}_{\gamma} + g\sum_{\beta}P^{e}_{\alpha\beta}\zeta^{n}_{\beta}\right. \\
& + (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,V^{2}_{e})\sum_{\beta}D^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta} + \frac{\Delta t}{2}\,U_{e}V_{e}\sum_{\beta}E^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta} + \frac{1}{2}(\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,V^{2}_{e})\sum_{\beta}G^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2}(\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,U^{2}_{e})\sum_{\beta}F^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta} - \left[\frac{K(W^{n})^{2}}{H^{n}}\cos\phi\right]^{e}\frac{\Delta^{e}}{3} \\
& \left. + g\left[\frac{\sqrt{((U^{n})^{2} + (V^{n})^{2})}}{H^{n}C^{2}_{h}}\right]^{e}\sum_{\beta}M^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta}\right\}
\end{aligned} \tag{2.65}$$

$$\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}V^{n+1/2}_{\beta} = & \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta} \\
& - \frac{\Delta t}{2}\left\{\sum_{\beta,\gamma}(X^{e}_{\alpha\beta\gamma}U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma}V^{n}_{\beta})\,V^{n}_{\gamma}\right. \\
& + \sum_{\beta,\gamma}N^{e}_{\alpha\beta\gamma}f_{\beta}U^{n}_{\gamma} + g\sum_{\beta}Q^{e}_{\alpha\beta}\zeta^{n}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2}(\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,V^{2}_{e})\sum_{\beta}E^{e}_{\alpha\beta}U^{n}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2}(\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,U^{2}_{e})\sum_{\beta}D^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta} \\
& + \frac{\Delta t}{2}\,U_{e}V_{e}\sum_{\beta}F^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta} + (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2}\,V^{2}_{e})\sum_{\beta}G^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta} \\
& - \left[\frac{K(W^{n})^{2}}{H^{n}}\sin\phi\right]^{e}\frac{\Delta^{e}}{3} \\
& \left. + g\left[\frac{\sqrt{((U^{n})^{2} + (V^{n})^{2})}}{H^{n}C^{2}_{h}}\right]^{e}\sum_{\beta}M^{e}_{\alpha\beta}V^{n}_{\beta}\right\}
\end{aligned} \tag{2.66}$$

2 **단계**:

$$
\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}\zeta^{n+1}_{\beta} \;=\; & \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta}\zeta^{n}_{\beta} \\
& - \Delta t \Big\{ \sum_{\beta,\gamma} (X^{e}_{\alpha\gamma\beta} U^{n+1/2}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\gamma\beta} V^{n+1/2}_{\beta}) H^{n+1/2}_{\gamma} \\
& + \sum_{\beta,\gamma} (X^{e}_{\alpha\gamma\beta} U^{n+1/2}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n+1/2}_{\beta}) H^{n+1/2}_{\gamma} \Big\}
\end{aligned}
\tag{2.67}
$$

$$
\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1}_{\beta} \;=\; & \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} U^{n}_{\beta} \\
& - \Delta t \Big\{ \sum_{\beta,\gamma} (X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U^{n+1/2}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n+1/2}_{\beta})\, U^{n+1/2}_{\gamma} \\
& - \sum_{\beta,\gamma} N^{e}_{\alpha\beta\gamma} f_{\beta} V^{n+1/2}_{\gamma} + g \sum_{\beta} P^{e}_{\alpha\beta} \zeta^{n+1/2}_{\beta} \\
& + (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2} U^{2}_{e}) \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1/2}_{\beta} + \Delta t\, U_{e} V_{e} \sum_{\beta} E^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1/2}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t V^{2}_{e}) \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1/2}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \Delta t U^{2}_{e}) \sum_{\beta} F^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} \\
& - \left[\frac{K\,(W^{n+1/2})^{2}}{H^{n+1/2}} \cos\phi \right]^{e} \frac{\Delta^{e}}{3} \\
& + g \left[\frac{\sqrt{((U^{n+1/2})^{2} + (V^{n+1/2})^{2})}}{H^{n+1/2} C^{2}_{h}} \right]^{e} \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1/2}_{\beta} \Big\}
\end{aligned}
\tag{2.68}
$$

$$
\begin{aligned}
\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} = & \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} V^{n}_{\beta} \\
& - \frac{\Delta t}{2} \Big\{ \sum_{\beta,\gamma} (X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U^{n+1/2}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n+1/2}_{\beta}) V^{n+1/2}_{\gamma} \\
& - \sum_{\beta,\gamma} N^{e}_{\alpha\beta\gamma} f_{\beta} U^{n+1/2}_{\gamma} + g \sum_{\beta} Q^{e}_{\alpha\beta} \zeta^{n+1/2}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2} V^{2}_{e}) \sum_{\beta} E^{e}_{\alpha\beta} U^{n+1/2}_{\beta} \\
& + \frac{1}{2} (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2} U^{2}_{e}) \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} \\
& + \frac{\Delta t}{2} U_{e} V_{e} \sum_{\beta} F^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} + (\nu_{\varepsilon} + \frac{\Delta t}{2} V^{2}_{e}) \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} \\
& - \left[\frac{K (W^{n+1/2})^{2}}{H^{n+1/2}} \sin \psi \right]^{e} \frac{\Delta^{e}}{3} \\
& + g \left[\frac{\sqrt{ ((U^{n+1/2})^{2} + (V^{n+1/2})^{2}) }}{H^{n+1/2} C^{2}_{h}} \right]^{e} \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} V^{n+1/2}_{\beta} \Big\}
\end{aligned}
\tag{2.69}
$$

이와 같은 2단계 양적 해법을 적용할 때, 식(2.64) 식(2.69)의 좌변의 요소 질량행렬 $[\overline{M}]^{2}$를 집중질량행열 $[\overline{M}]^{e}$에 치환한다. 각 요소의 집중계수는

$$
\overline{M^{e}_{\alpha\beta}} = \frac{\Delta^{e}}{3} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix} = \frac{\Delta^{e}}{3} \delta_{\alpha\beta}. \tag{2.70}
$$

로 된다. 그러나, 시간에 대한 이산화와 2단계 양적 해법에서, 인공적으로 도입된 점성이 커서, 실제 계산으로 얻어지는 유속결과가 해석해에 비해 작은 것으로 된다는 것이 판명되고 있다. 계산을 안정하게 하도록 도입된 인공점성을 0으로 하는 것은 불가능하지만, 극한영향이 작도록 조절하여야한다. 이 때문에 우변의 비집중질량행렬 대신에 식(2.71)를 사용한다.

$$\widetilde{M}^{e}{}_{\alpha\beta} = \varepsilon \ \overline{M}^{e}{}_{\alpha\beta} + (1 - \varepsilon) M^{e}_{\alpha\beta} \quad (0 \le \varepsilon \le 1) \tag{2.71}$$

여기에서 ε**을 혼합비**(selective lumping) **계수라고 하고**, $\varepsilon = 0.9$ **정도를 적용 한다**.

3. 흐름에 의한 오염확산의 해석

3.1 이류확산의 지배방정식

물질수송현상의 특징은 물질이 그 농도의 구배에 따라 확산하는 현상과 운동하는 유체에 의해 움직여지는 '이류'라고 불려지는 현상이 혼재하고 있다는 것이다. 유체가 운동하고 있는 천수역에서의 오탁물질의 이동현상은 특별한 경우를 제외하고는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HUC)}{\partial x} + \frac{\partial(HVC)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x}\left(Hk\frac{\partial C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(Hk\frac{\partial C}{\partial y}\right) - HS = 0 \tag{3.1}$$

여기에, C = 오탁물질농도 (kg/m^3)

S = 단위시간당의 물질방출강도 ($kg/m^3 \cdot s$)

k = 확산계수 (m^2/s)

U, V = 유속 u, v를 연직방향으로 적분하여 그 수심평균을 취한 x, y 방향의 유속(m/s)

H = 전 수심(m)

식(3.1)를 변환시키면 다음과 같다.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y}\right)C + H\left(\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y}\right)$$

$$-k\left(\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial C}{\partial x}+\frac{\partial H}{\partial y}\frac{\partial C}{\partial y}\right)-kH\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)-SH=0 \tag{3.2}$$

연속방정식(2.9)에 의해 위식의 좌변 제1항은 0이 된다. 또 양변을 H로 나누면 다음과 같이 나타난다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U\frac{\partial C}{\partial x}+V\frac{\partial C}{\partial y}$$
$$-\frac{k}{H}\left(\frac{\partial H}{\partial x}\frac{\partial C}{\partial x}+\frac{\partial H}{\partial y}\frac{\partial C}{\partial y}\right)-k\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)-S=0 \tag{3.3}$$

이 좌변의 제 4항은 통상 작으므로 무시한다. 이때 이류확산의 기초방정식은 식(3.4)로 주어진다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+U\frac{\partial C}{\partial x}+V\frac{\partial C}{\partial y}-k\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 C}{\partial y^2}\right)=S \tag{3.4}$$

3.2 경계조건

농도가 규정된 경계를 Γ_c, 질량 flux가 규정되는 경계를 Γ_q라 한다.

● 경계조건

Γ_c 상에서는 $C=C_B$ (3.5)

Γ_q 상에서는 $-\eta\frac{\partial C}{\partial n}=q_B$ (3.6)

3.3 테일러법에 의한 이산화

시간 증분을 △t 로 하면 임의의 시각에 대한 농도를 Taylor 정리에 의해

$$C(x, y, t+\triangle t) = C(x, y, t) + \triangle t \frac{\partial C}{\partial t}(x, y, t)$$

$$+ \frac{\triangle t^2}{2} \frac{\partial^2 C}{\partial t^2}(x, y, t) + O(\triangle t^2) \qquad (3.7)$$

시간 스텝 $t_{n+1} = t_n + \triangle t (n=0,1,2,\cdots)$에서, 고차의 항 $O(\triangle t^3)$를 무시한 다음과 같은 근사 공식을 고려한다.

$$\frac{C^{n+1}(x, y) - C^n(x, y)}{\triangle t} = \frac{\partial C^n}{\partial t}(x, y) + \frac{\triangle t}{2} \frac{\partial^2 C^n}{\partial t^2}(x, y) \qquad (3.8)$$

이류확산의 기초방정식(3.4)로부터, 비정상 이류부분만을 고려하여 다음식으로 둔다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y} = 0 \qquad (3.9)$$

이때, 시간에 관한 2계도함수는 식(2.30)와 식(2.31)에 의해, 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial^2 C}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left(- U\frac{\partial C}{\partial x} - V\frac{\partial C}{\partial y}\right)$$

$$= - \frac{\partial U}{\partial t}\frac{\partial C}{\partial x} - U\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right) - \frac{\partial V}{\partial t}\frac{\partial C}{\partial y} - V\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)$$

$$= (U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y})\frac{\partial C}{\partial x} + U\frac{\partial}{\partial x}(U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y})$$

$$+ (U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y})\frac{\partial C}{\partial y} + V\frac{\partial}{\partial y}(U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y})$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}\{U(U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y})\} + \frac{\partial}{\partial y}\{V(U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y})$$

$$+ (\frac{\partial U}{\partial x}\frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial V}{\partial y}\frac{\partial C}{\partial x}) - V(\frac{\partial U}{\partial x}\frac{\partial C}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial y}\frac{\partial C}{\partial x}) \tag{3.10}$$

$$= \frac{\partial}{\partial x}\{U(U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y})\} + \frac{\partial}{\partial y}\{V(U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y})$$

$$+ U\frac{\partial(V, C)}{\partial(x, y)} - V\frac{\partial(U, C)}{\partial(x, y)}$$

최종적으로 얻어진 두 개의 자코비안을 작다고 가정하고 무시한다. 식(3.8)을 이용하여 이류확산방정식 식(3.4)를 시간에 관하여 다음과 같이 이산화 할 수 있다.

$$\frac{C^{n+1} - C^n}{\triangle t} - \frac{\triangle t}{2}\frac{\partial^2 C^n}{\partial t^2} + U^n\frac{\partial C^n}{\partial x} + V^n\frac{\partial C^n}{\partial y}$$
$$= \frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial C^n}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial C^n}{\partial y}) + S^n \tag{3.11}$$

이것을 식(3.10)으로 다음과 같은 이산화된 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{C^{n+1} - C^n}{\triangle t} + U^n\frac{\partial C^n}{\partial x} + V^n\frac{\partial C^n}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(k_{xx}\frac{\partial C^n}{\partial x} + k_{xy}\frac{\partial C^n}{\partial y})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y}(k_{yx}\frac{\partial C^n}{\partial x} + k_{yy}\frac{\partial C^n}{\partial y}) + S^n \tag{3.12}$$

여기에서 이산화에 등가인 인공확산계수는 식(3.13)으로 주어진다.

$$k_{xx} = k + \frac{\triangle t}{2} U^2$$

$$k_{xy} = k_{yx} = \frac{\triangle t}{2} UV$$

$$k_{yy} = k + \frac{\triangle t}{2} V^2 \tag{3.13}$$

이상으로부터 이산화에 있어서 질량 flux는 다음과 같이 둔다.

$$\hat{J}_x = -\left(k_{xx}\frac{\partial C}{\partial x} + k_{xy}\frac{\partial C}{\partial y} \right) \tag{3.14}$$

$$\hat{J}_y = -\left(k_{yx}\frac{\partial C}{\partial x} + k_{yy}\frac{\partial C}{\partial y} \right) \tag{3.15}$$

3.4 유한요소법에 의한 이산화

농도경계 Γc 상에서 $\delta C = 0$이 되도록 한 임의의 가중함수 δC를 식(3.4)의 양변에 부가하여 영역Ω로 적분한다. n step째의 표시를 생략하여 정리하면 식(3.16)과 같다.

$$\int_\Omega \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\triangle t} d\Omega + \int_\Omega \delta C \left(U\frac{\partial C}{\partial x} + V\frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$+ \int_\Omega \delta C \left(\frac{\partial \hat{J}_x}{\partial x} + \frac{\partial \hat{J}_y}{\partial y} \right) d\Omega = \int_\Omega S \delta C d\Omega \tag{3.16}$$

좌변의 제 3항에 Gauss-Green의 정리를 적용하여 부분적분하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\triangle t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta C \left(U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega$$

$$+ \int_{\Gamma_q} \delta C \hat{J}_n d\Gamma - \int_{\Omega} \left(\frac{\partial \delta C}{\partial x} \hat{J}_x + \int_{\Omega} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \hat{J}_y \right) d\Omega = \int_{\Omega} S \delta C d\Omega \tag{3.17}$$

경계조건 식(4.6)을 고려하면 다음식으로서 나타난다.

$$\begin{aligned} &\int_{\Omega} \delta C \frac{C^{n+1} - C}{\triangle t} d\Omega + \int_{\Omega} \delta C \left(U \frac{\partial C}{\partial x} + V \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega \\ &+ \int_{\Omega} \left(k_{xx} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + k_{xy} \frac{\partial \delta C}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial y} \right. \\ &\left. + k_{yx} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial x} + k_{yy} \frac{\partial \delta C}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) d\Omega \\ &= \int_{\Omega} S \delta C d\Omega - \int_{\Gamma_q} q_B \delta C d\Gamma \end{aligned} \tag{3.18}$$

영역 Ω를 삼각형의 유한요소로 분할하고 미지의 농도 C와 가중함수 δC를 각각의 유한요소 내에서 다음과 같이 근사한다.

$$C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} C_{\alpha}, \quad \delta C = \sum_{\alpha} \phi_{\alpha} \delta C_{\alpha} \tag{3.19}$$

여기서 $\phi_{\alpha}(\alpha = 1, 2, 3)$은 삼각형 유한요소 e에 있어서 1차의 보간함수이다. 이때, 요소내 각 보간함수의 미분과 적분을 다음과 같이 정의해 둔다.

$$M^{e}_{\alpha\beta} = \int_{e} \phi_{\alpha} \phi_{\beta} d\Omega = \frac{\triangle^{e}}{12} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \tag{3.20a}$$

$$X^{e}_{\alpha\beta\gamma} = \int_{e} \phi_{\alpha} \phi_{\beta} \frac{\partial \phi_{r}}{\partial x} d\Omega = \frac{b_{r}}{24} (1 + \delta_{\alpha\beta}) \tag{3.20b}$$

$$Y^e_{\alpha\beta\gamma} = \int_e \phi_\alpha \phi_\beta \frac{\partial \phi_r}{\partial y} d\Omega = \frac{c_r}{24}(1 + \delta_{\alpha\beta}) \tag{3.20c}$$

$$D^e_{\alpha\beta} = \int_e \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x} \frac{\partial \phi_\beta}{\partial y} d\Omega = \frac{b_\alpha b_\beta}{4 \triangle^e} \tag{3.20d}$$

$$E^e_{\alpha\beta} = \int_e \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial x} \frac{\partial \phi_\beta}{\partial y} d\Omega = \frac{b_\alpha c_\beta}{4 \triangle^e} \tag{3.20e}$$

$$F^e_{\alpha\beta} = \int_e \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial y} \frac{\partial \phi_\beta}{\partial x} d\Omega = \frac{c_\alpha b_\beta}{4 \triangle^e} \tag{3.20f}$$

$$G^e_{\alpha\beta} = \int_e \frac{\partial \phi_\alpha}{\partial y} \frac{\partial \phi_\beta}{\partial y} d\Omega = \frac{c_\alpha c_\beta}{4 \triangle^e} \tag{3.20g}$$

$$S_\alpha = \int_\Omega S \phi_\alpha d\Omega - \int_{\Gamma^e_q} q_B \phi_\alpha d\Gamma = \frac{\triangle^e}{3} S^e - \int_{\Gamma^e_q} q_B \phi_\alpha d\Gamma \tag{3.20h}$$

식(3.19)를 식(3.18)에 대입하고, 식(3.20)을 이용하여 δC가 임의인 것에 따라 다음과 같은 요소방정식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} &\sum_\beta M^e_{\alpha\beta} \frac{C^{n+1}_\beta - C_\beta}{\triangle t} + \sum_{\beta,\gamma} X^e_{\alpha\beta\gamma} U_\beta C_r + \sum_{\beta,\gamma} Y^e_{\alpha\beta\gamma} V_\beta C_r \\ &+ (K + \frac{\triangle t}{2} U^2_e) \sum_\beta D^e_{\alpha\beta} C_\beta + \frac{\triangle t}{2} U_e V_e \sum_\beta (E^e_{\alpha\beta} + F^e_{\alpha\beta}) C_\beta \\ &+ (K + \frac{\triangle t}{2} V^2_e) \sum_\beta G^e_{\alpha\beta} C_\beta = S_\alpha (\alpha = 1, 2, 3) \end{aligned} \tag{3.21}$$

이것을 모든 요소에 적용하여 합치면 영역 전체에서의 유한요소방정식이 얻어진다.

3.5 계산 해법

조류해석과 마찬가지로 2단계 양적 해법을 이용하면, 식(3.21)은 n step에서

1 **단계**

$$\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} C^{n+1/2}_{\beta} = \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} \tag{3.22}$$

$$- \frac{\triangle t}{2} \{ \sum_{\beta\gamma} (X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n}_{\beta}) C^{n}_{\gamma}$$

$$+ k^{n}_{xx} \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} + k^{n}_{xy} \sum_{\beta} (E^{e}_{\alpha\beta} + F^{e}_{\beta}) C^{n}_{\beta}$$

$$+ k^{n}_{yy} \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} - S^{n}_{\alpha} \}$$

2**단계**

$$\sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} C^{n+1}_{\beta} = \sum_{\beta} M^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} \tag{3.23}$$

$$- \triangle t \{ \sum_{\beta,\gamma} (X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U^{n+1/2}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n+1/2}_{\beta}) C^{n+1/2}_{\gamma}$$

$$+ k^{n+1/2}_{xx} \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} C^{n+1/2}_{\beta} + k^{n+1/2}_{xy} \sum_{\beta} (E^{e}_{\alpha\beta} + F^{e}_{\beta}) C^{n+1/2}_{\beta}$$

$$+ k^{n+1/2}_{yy} \sum_{\beta} G^{e}_{\alpha\beta} C^{n+1/2}_{\beta} - S^{n+1/2}_{\alpha} \}$$

좌변의 요소질량행렬을 집중 질량화 하고, **우변의 요소질량행렬을 식**(2.71)**와 같이 수정하면 다음식으로 정의된다**.

1**단계**:

$$\sum_{\beta} \overline{M}^{e}_{\alpha\beta} C^{n+1/2}_{\beta} = \sum_{\beta} \widehat{M}^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} \tag{3.24}$$

$$- \frac{\triangle t}{2} \{ \sum_{\beta\gamma} (X^{e}_{\alpha\beta\gamma} U^{n}_{\beta} + Y^{e}_{\alpha\beta\gamma} V^{n}_{\beta}) C^{n}_{\gamma}$$

$$+ k^{n}_{xx} \sum_{\beta} D^{e}_{\alpha\beta} C^{n}_{\beta} + K^{n}_{xy} \sum_{\beta} (E^{e}_{\alpha\beta} + F^{e}_{\alpha\beta}) C^{n}_{\beta}$$

$$+ k_{yy}^{n} \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^{e} C_{\beta}^{n} - S_{\alpha}^{n} \}$$

2**단계**:

$$\sum_{\beta} \overline{M}_{\alpha\beta}^{e} C_{\beta}^{n+1} = \sum_{\beta} \widehat{M}_{\alpha\beta}^{e} C_{\beta}^{n} \tag{3.25}$$

$$- \triangle t \{ \sum_{\beta,\gamma} (X_{\alpha\beta\gamma}^{e} U_{\beta}^{n+1/2} + Y_{\alpha\beta\gamma}^{e} V_{\beta}^{n+1/2}) C_{\gamma}^{n+1/2}$$

$$+ k_{xx}^{n+1/2} \sum_{\beta} D_{\alpha\beta}^{e} C_{\beta}^{n+1/2} + k_{xy}^{n+1/2} \sum_{\beta} (E_{\alpha\beta}^{e} + F_{\alpha\beta}^{e}) C_{\beta}^{n+1/2}$$

$$+ k_{yy}^{n+1/2} \sum_{\beta} G_{\alpha\beta}^{e} C_{\beta}^{n+1/2} - S_{\alpha}^{n+1/2} \}$$

4. 모델의 수렴 및 검증

4.1 장방형 모델의 구성

유한요소의 적용과 컴퓨터 프로그램의 알고리즘을 증명하기 위해 계산해를 적용하기 위한 모델을 선택하고 Brebbia(1976)의 연구에서 얻어진 해석해와 비교 검증한다.

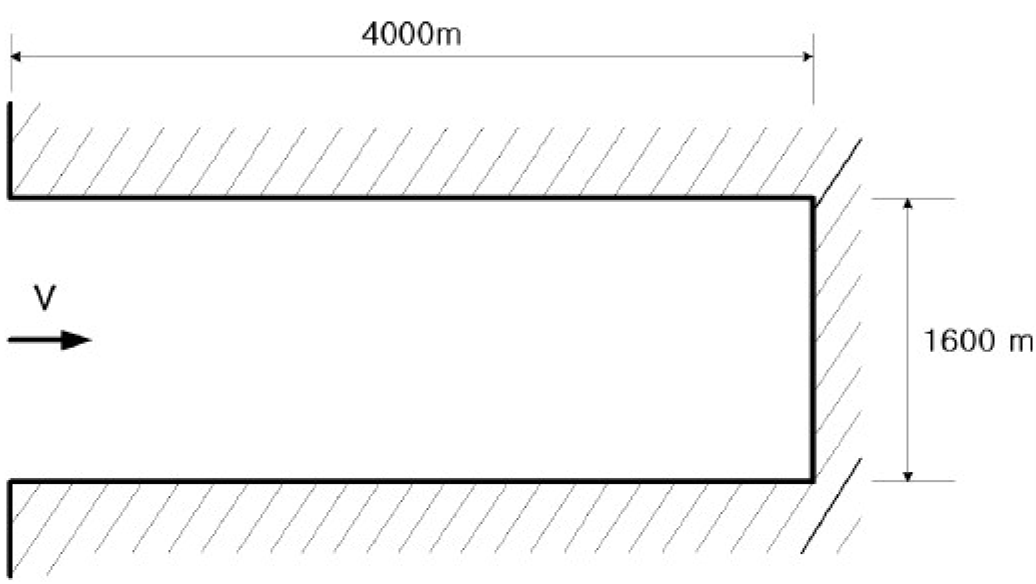


Fig.4.1 Definition sketch of rectangular harbor

선택된 모델은 Fig.4.1과 같은 1600×4000m의 장방형 수로로서 수심은 일정하다. 본 연구의 유한요소 프로그램은 전장의 식들을 기초로 하여 적용시켰다. Fig.4.2는 장방형 직사각형 수로의 유한요소의 이산화를 보여주는 것으로 격자는 NP=113, NE=192개로 구성하였으며, A-B, B-D, 그리고 D-C경계는 평

균속도가 0인 고정경계(Fixed boundary)이고, C-A는 속도를 가진 개방경계(Open boundary)를 나타낸다.

본 모델에 적용된 파라메타로는 진폭=0.5m, 주기=3600sec, 수심=20m, 길이=4000m이고, 시간증분(Δt)=5.625sec로 한다. 초기흐름 속도와 초기 조위값은 0으로 가정한다.

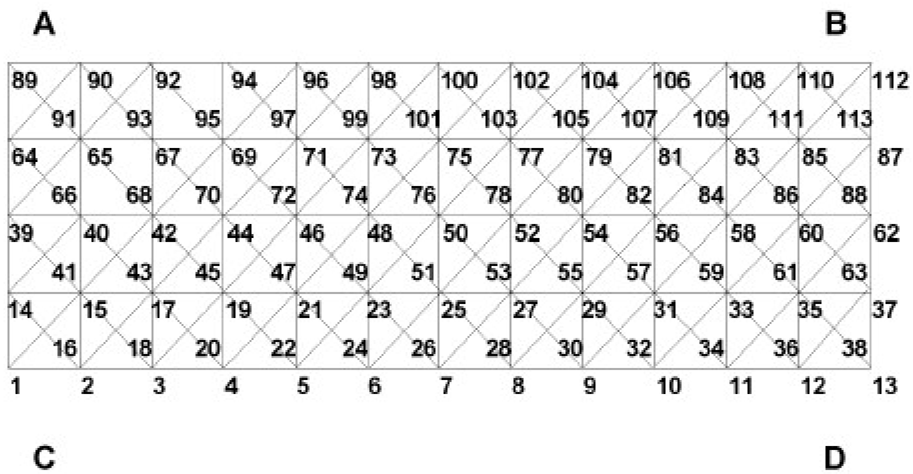


Fig.4.2 Finite element grid for rectangular channel

4.2 장방형 모델의 수치실험 및 분석

1차원 수로에서, Brebbia에 의하면 바닥 전단 응력과 코리올리력을 무시할 경우, 1차원 모델의 해석해는 다음과 같다.

$$\zeta = \frac{a}{\cos\left(\frac{wl}{\sqrt{gh}}\right)} \cos\left[\frac{wl}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l} - 1\right)\right] \sin wt \tag{4.1}$$

$$U = \frac{a\sqrt{gh}}{h\cos\left(\frac{wl}{\sqrt{gh}}\right)} \sin\left[\frac{wl}{\sqrt{gh}}\left(\frac{x}{l} - 1\right)\right] \cos wt \tag{4.2}$$

여기서, x = 수로 입구로 부터의 거리(m)

a = 진폭(m)

l = 장방향 수로길이(m)

h = 수로 수심(m)

T = 주기(sec)

w = 각속도$(2\pi T)$

식(4.1)과 식(4.2)에 본 연구의 대상 모델에 적용한 x=2000m, a=0.5m, h=20m, T=3600sec, $w = (2\pi/T)$와 동일 파라메타 값을 적용한 후의 대상 모델과 비교 분석한 값은 Fig.4.3과 Fig.4.4이며, 이때의 유동장은 Fig.4.5와 같다.

Fig.4.3 과 Fig.4.4는 Brebbia의 해석해와 본 연구의 대상 모델인 장방형 수로의 중앙에 위치한 절점번호 50번의 명확한 FEM 해를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 조석과 흐름속도의 FEM 해와 해석해를 비교해보면, FEM 해와 해석해의 그래프가 진폭 및 주기성에서 비교적 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

조석에 의한 부유사 농도의 확산 분석을 위해 이류-확산 방정식에 적용될 확산계수는 Boweden(1967), Hansen & Rattray(1965), Fischer(1972),등에 의해 많이 연구되고 있으나, 본 모델에서는 단위확산계수 1㎡/sec를 사용하였다.

Fig.4.2에서 고정경계인 B-D에 단위농도의 오염부하를 주어 시간의 경과에 따른 오염물 농도 변화를 Fig.4.6와 같이 나타난다.

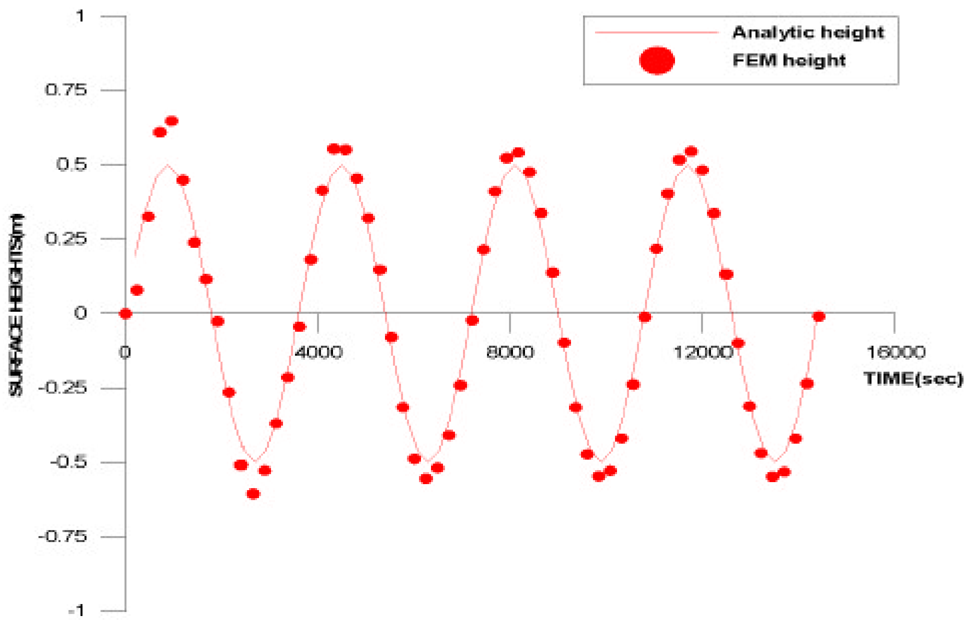


Fig.4.3 Comparison of analytical and FEM solution

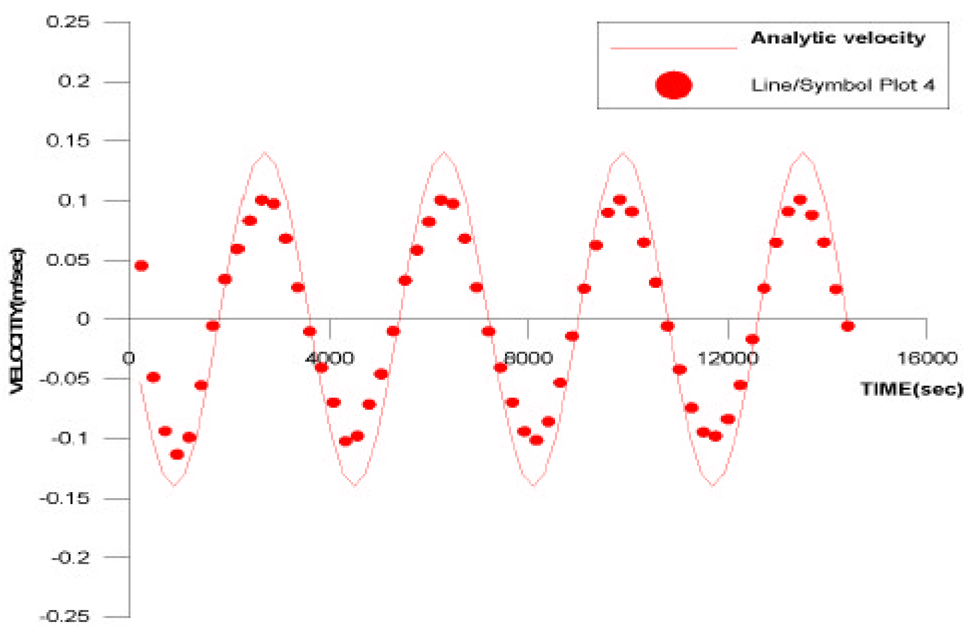
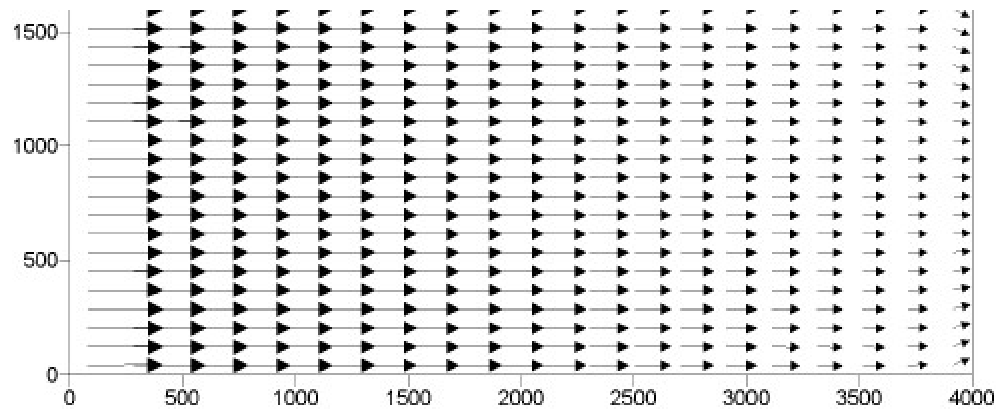
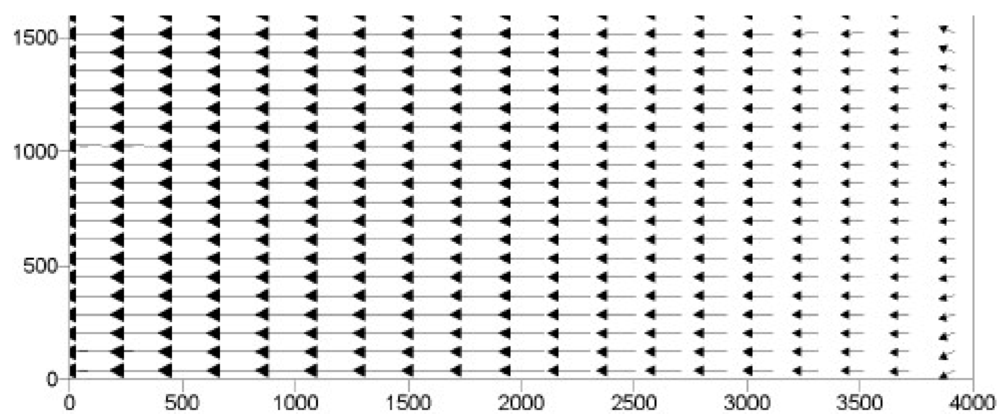


Fig.4.4 Comparison of analytical and FEM solution

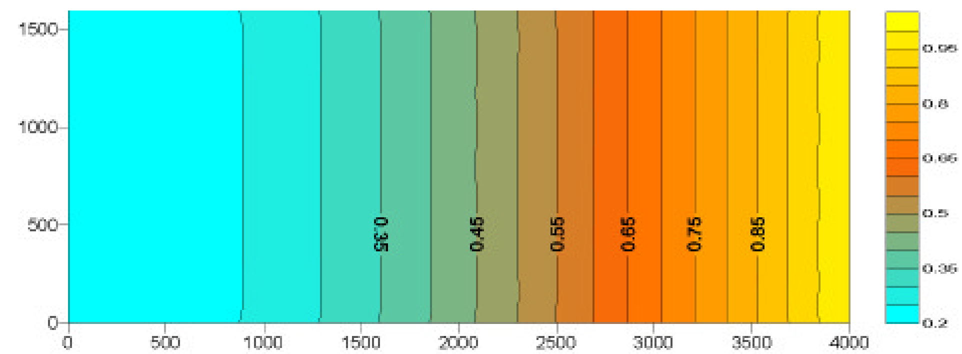


(Maximum flood flow)

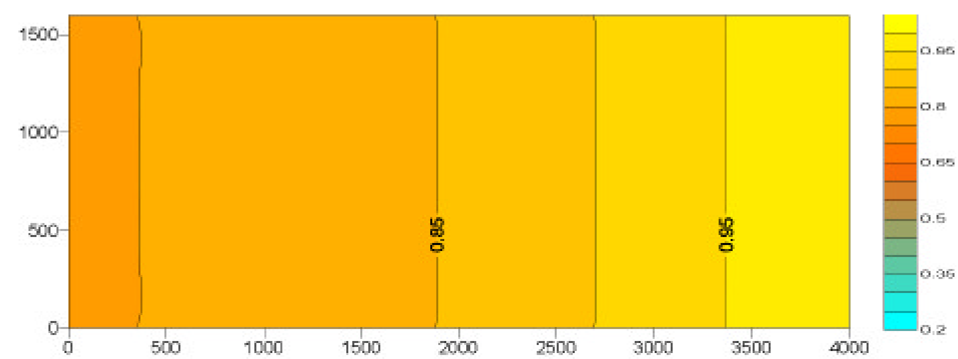


(Maximum ebb flow)

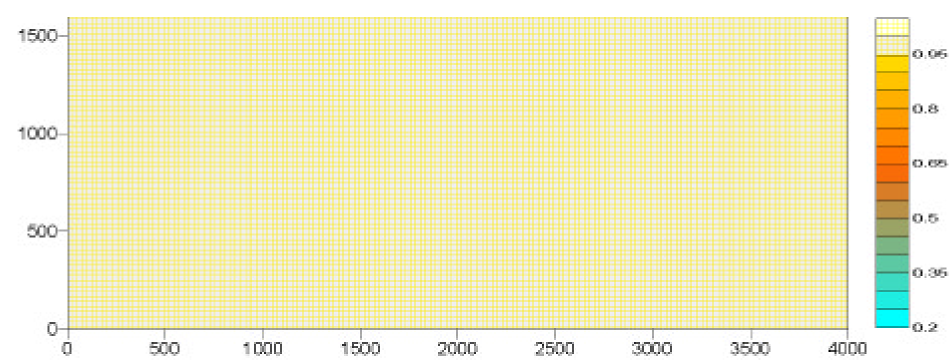
Fig.4.5 Computed tidal current



(A) Distribution of contaminant(after 30 minutes)



(B) Distribution of contaminant(after 2 hours)



(C) Distribution of contaminant(after 4 hours)

Fig.4.6 Distribution of contaminant

시간의 경과에 따른 오염물 농도의 확산을 상세히 관찰하기 위하여 Fig.4.2에서 나타난 장방형 수평축에서 수로의 중앙부분인 절점 번호 39 62번의 직선 부분에 대한 농도 변화를 Fig.4.7에서 그래프로 나타내고 있다. Fig.4.6 및 Fig.4.7에서 알 수 있듯이 오염물 발생 30분 후의 경우는 고정경계BD 구간에서부터 개방경계AC까지 오염물이 단계적으로 확산되며, 4시간 경과후의 경우 장방형 수로 전체가 농도 1값에 근사화 되어 수로의 안쪽에서 바깥쪽으로 오염물 농도가 시간이 경과함에 따라 전체적으로 확산되고 있는 것을 예측 할 수 있다.

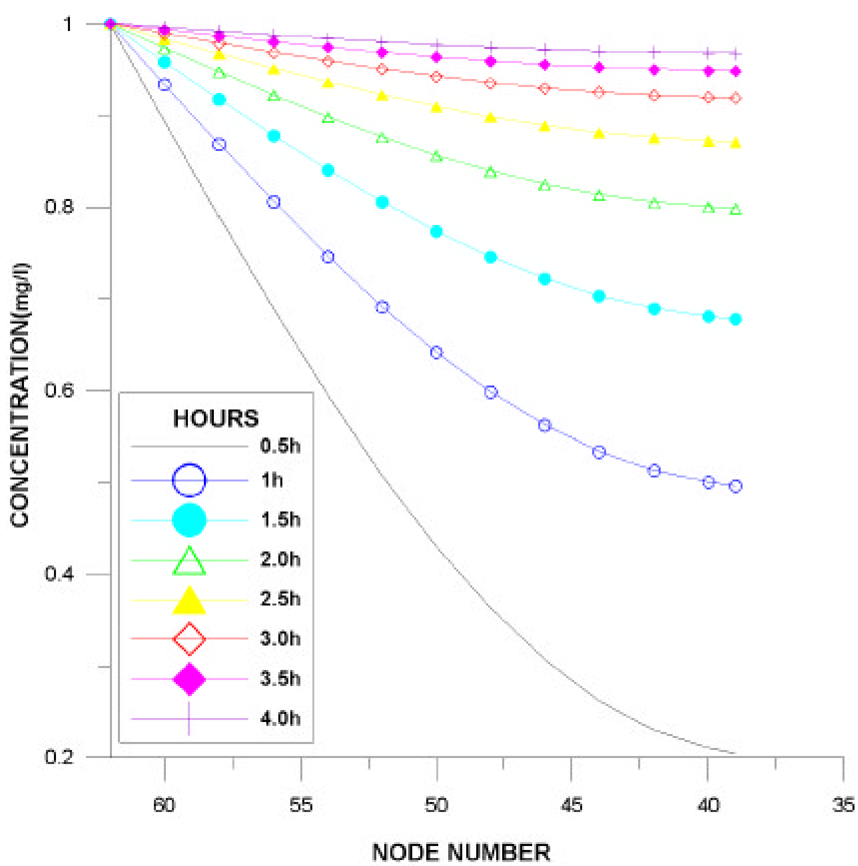


Fig.4.7 Concentration of contaminant in channel

5. 모델의 현장 적용

5.1 대상영역의 특성

본 연구의 대상영역인 가덕도 연안은 한반도의 동남단에 자리잡고 있으며 동으로는 사하구 다대포, 서남북으로는 거제도 동북 바다와 진해만, 북으로는 송정동과 진해시 용원동과 접하고 있다. 진해시 용원과의 거리는 4㎞이고, 인근 도서인 거제도와의 거리는 10㎞이다. 가덕도 연안은 유인도 2개(가덕도, 눌차도)와 무인도 11개 등 총 13개 섬으로 이루어져 있으며, 수질이 깨끗하여 수달, 재갈매기, 굴 등 육상 및 해상의 동식물이 군락을 이루고 있는 자연 생태계의 보고이다. 또한 가덕도 연안은 부산항을 국제 경쟁력을 보유한 중추항만으로서의 역할을 유지하며, 기존항만의 확장만으로는 물동량 처리 한계로 인하여 신항만 개발의 필요성으로 가덕 신항만을 1995 2011년까지 3단계 계획이 추진 중에 있다. 추진되고 있는 주요시설로는 부두(북컨테이너부두, 남컨테이너부두, 일반부두, 작업부두 등), 항만관련단지(북컨테이너부두 항만관련단지, 남컨테이너부두 항만관련단지), 방파제(동방파제, 서방파제), 준설토 투기장(호안포함) 등이 계획 진행중이다. 따라서, 다가오는 21세기의 가덕도는 섬이 아닌 섬으로 다시 태어나 서부산권 경제는 물론, 한국경제를 다시 쓰는 크나큰 전기가 될 전망이다.

가덕도 신항 보고서(1999)에 의하면 신항만 개발지역의 평균고조 간격은 8시간 18분이며, 대조평균만조위는 178.3cm로 부산항의 122.3cm보다 56cm 높으나 우리나라의 서해안 및 남해서부에 비해 조차가 적은 편이며, 일조부등은 현저하지 않으며 1일 2회 규칙적인 승강을 하고, 최고고조는 하계에는 야간에, 동계에는 주간에 나타난다. 대조차는 166.0cm, 평균조차는 113.4cm이고 소조

차는 60.8cm이다. 부산신항만의 외곽시설물이나 항내 정온도에 큰 영향을 미치는 주 진입파랑은 S 및 SW계열의 파랑이다.

구 건교부 수로국 발행 조류도에 의하면, 가덕도 주변 해역의 창, 낙조시 최강유속은 약 0.1 1.1m/sec이고, 연평균 풍속은 3.9m/sec이며 풍향은 겨울철에 북서풍이, 여름철에 남서풍이 우세하다. Fig.5.1은 가덕도 신항만의 위치도이다.

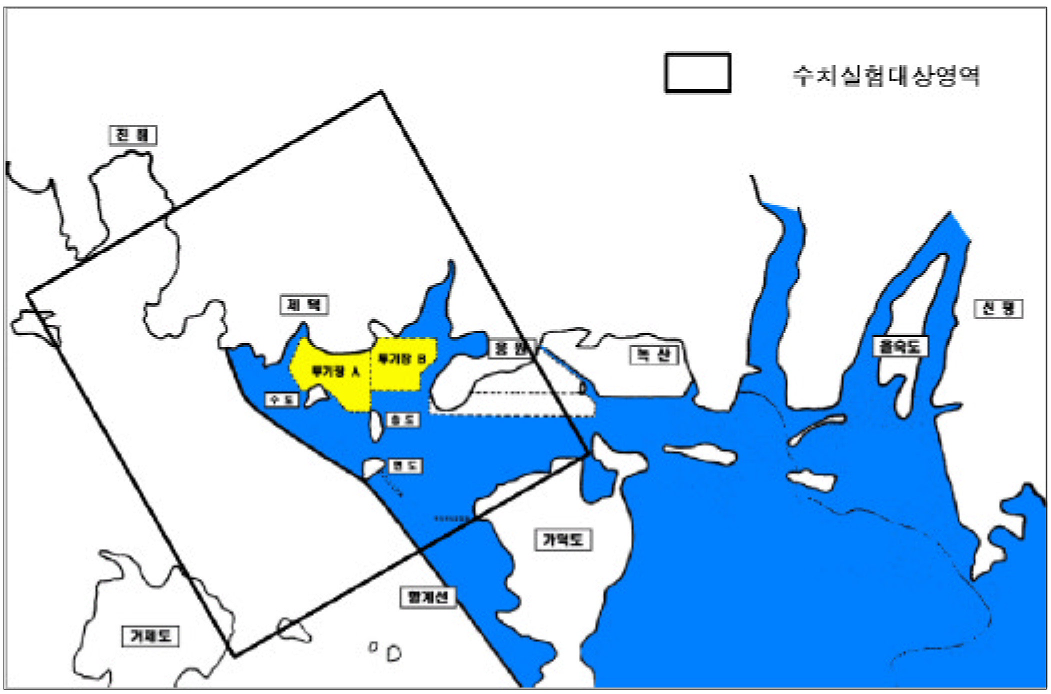


Fig.5.1 Location map for numerical simulation

5.2 모델의 구성

신항만 부지 조성을 위해 Fig.5.1에 제시된 것과 같이, 준설토를 투기하여 배후지를 확보하는 것으로 계획하고 있다. Fig.5.1의 투기장 A, B 건설을 위해 1차적으로 호안 공사가 Fig.5.3과 같이 단계적으로 진행되고 있으나 공사가 진행됨에 따라 예상되는 해수유동 변화와 부유물질 확산패턴의 분석이 부족한 실정에 있다.

본 연구에서는 A지구의 호안 공사 단계에 따른 유동 및 이로 인해 발생하는 오염물의 확산특성을 분석하는데 목표를 두고, 실험을 수행하였다. 모델의 구성은 호안 설치 진행 과정에 따라 Case 1, Case 2, Case 3의 3단계로 Fig.5.4에서처럼 분류하여 유동장의 변화와 단계별 공사 과정에서 발생하는 부유물질의 투기로 인한 항 내 오염물 확산분포를 예측하고자 한다.

대상영역의 수치모델은 유한요소법(FEM)으로서 격자의 구성은 삼각형 요소로 요소의 한변이 25 400m인 가변요소를 선택하였으며, 방파제, 호안, 섬 주위는 상세한 정보를 얻기 위해 더욱 세밀한 요소로 구성하고 수로중앙부의 수심이 깊은 곳은 요소의 크기를 크게하였다. Fig.5.2는 유한요소 격자망도를 나타내고 있으며, 각 단계별 Case 1, Case 2, Case 3의 NP, NE, NB는 Table 5.1과 같다. Fig.5.3에서 나타난 Point(P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7)는 각 지점의 조석 과 유속을 측정 및 비교하기 위한 지점이며, A-B 및 C-D구간은 호안이 설치되고 있는 지역에서 사석공 투하시 발생하는 SS부하량의 농도값과 농도변화를 수직 및 수평으로 측정하기 위해 주어진 구간이다

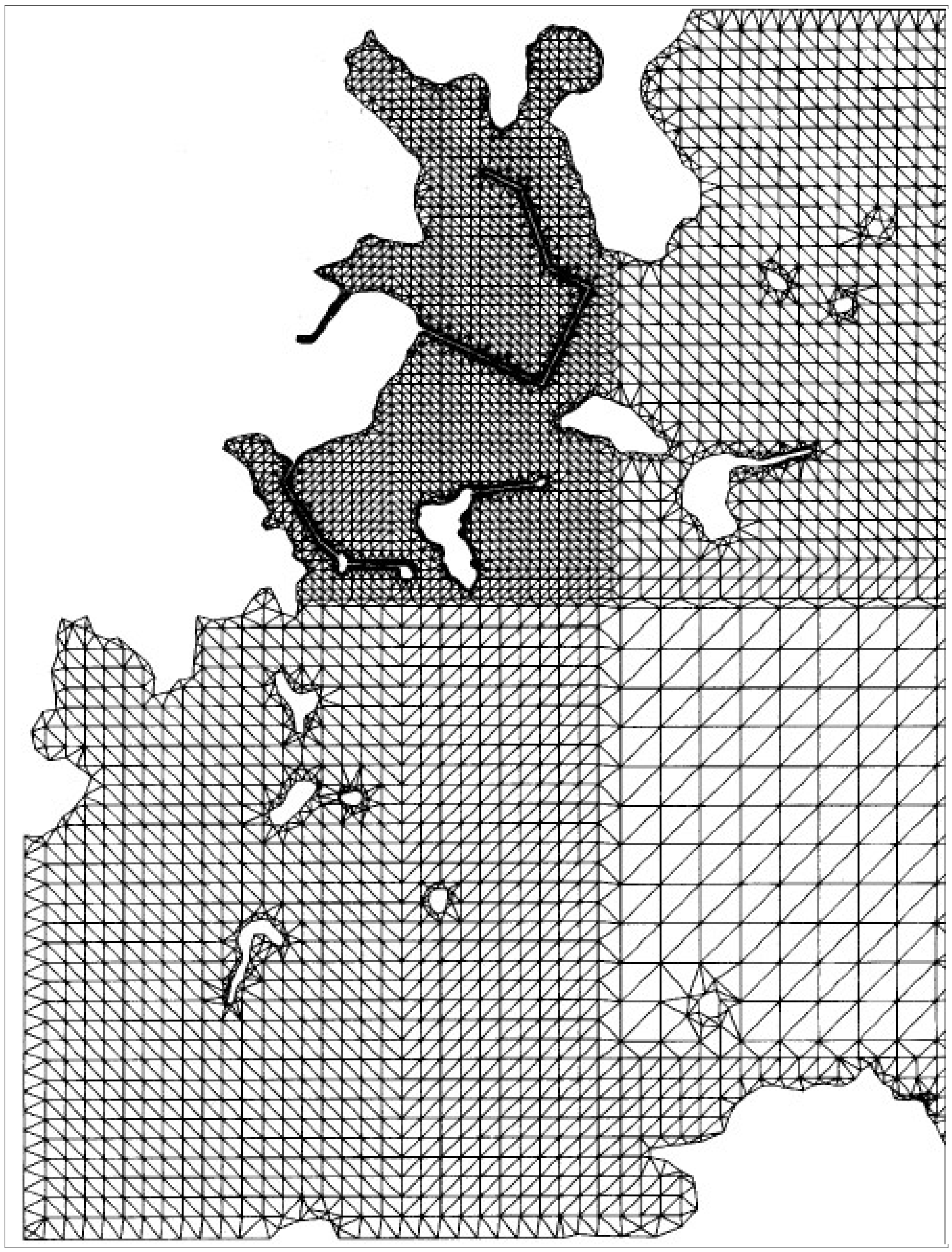


Fig.5.2 Finite elemnet grid for domain

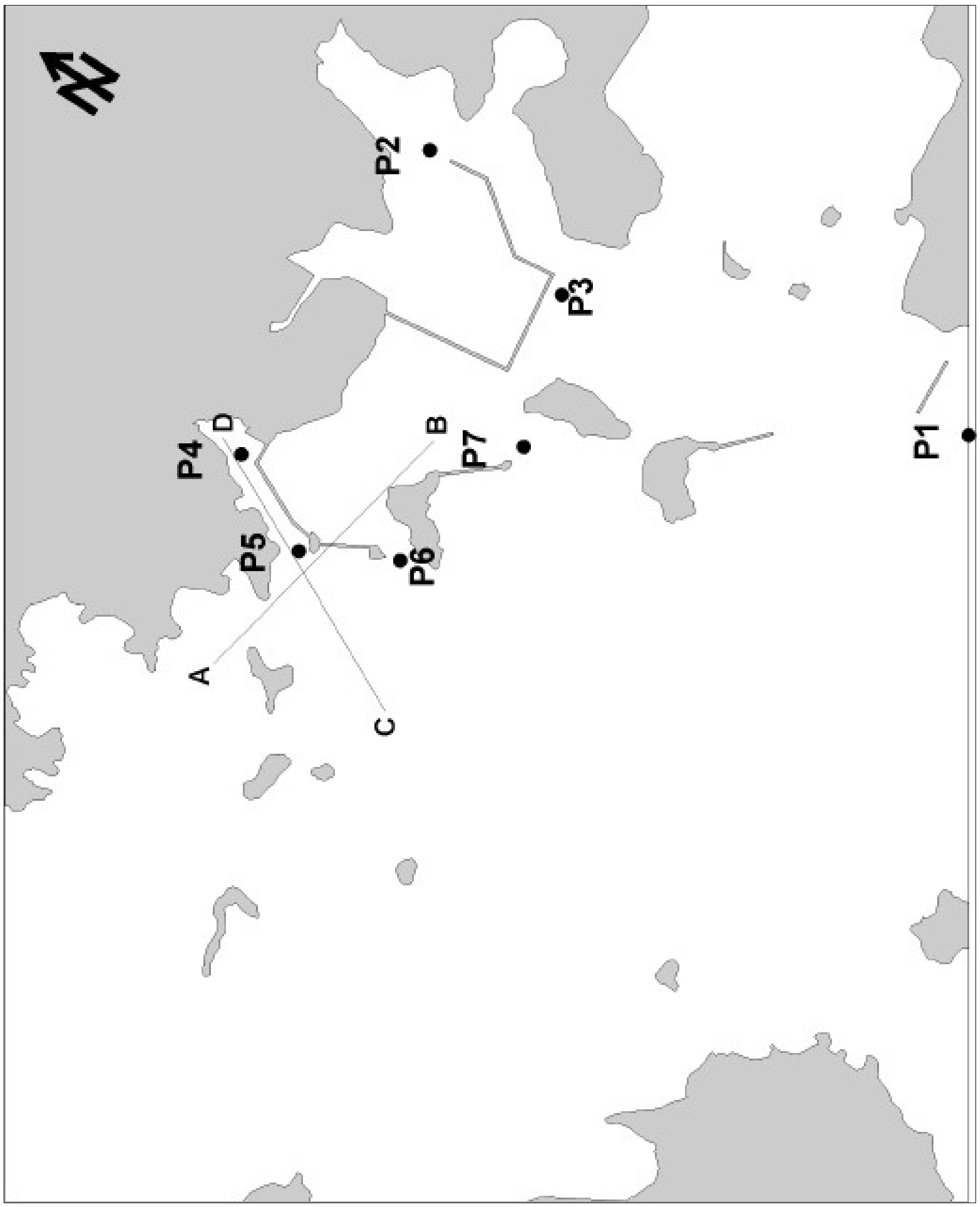


Fig.5.3 Selected reference stations for analysis

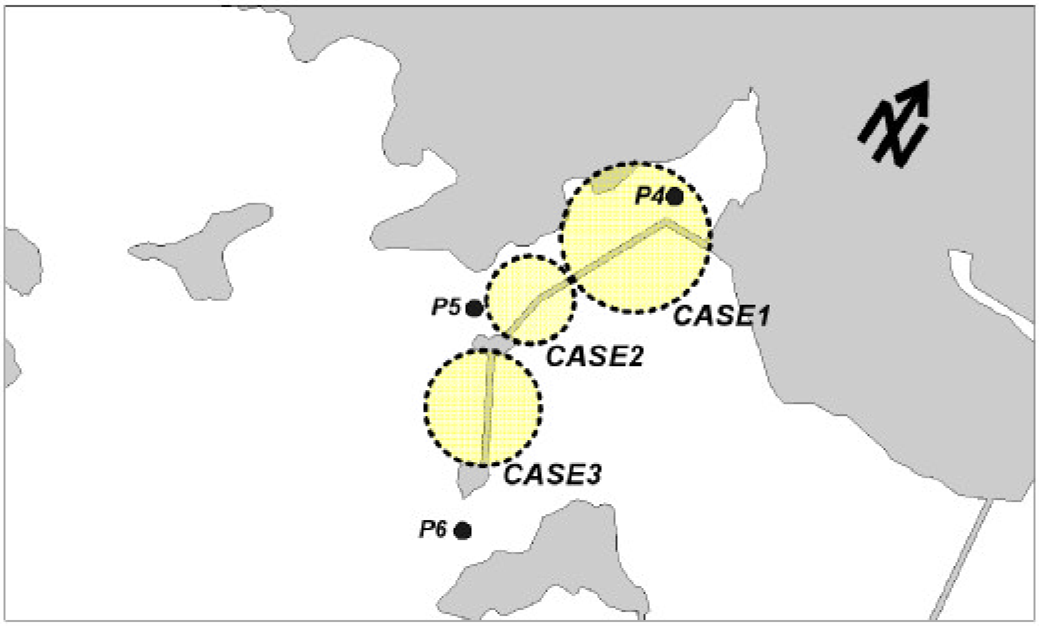


Fig.5.4 Site for each case of the construction work

Table 5.1 Case studies at the new harbor site

	Number of nodes	Number of element	Number of boundary elements
Case 1	5020	8701	1548
Case 2	5020	8746	1320
Case 3	5020	8760	1308

5.3 수치실험 및 분석

5.3.1 해수유동 시뮬레이션

본 연구에서는 가덕도 신항만을 대상으로 호안 설치 진행 과정에 따라 Case 1, Case 2, Case 3의 3단계로 분류하여 각 Case별로 해안선 및 해저지형의 변화로 인해 발생하는 흐름패턴을 예측하고자 한다. 실험영역은 x방향으로 12.5km, y방향으로 10.8km로 설정하고 진북에 대해 32° 반시계 방향으로 좌표축을 선택하였다. Fig.5.5는 본 대상 지역의 등수심도 이다. 대상영역의 최강 창조류 및 최강 낙조류의 벡터도는 Fig.5.6, Fig.5.7과 같다. 모델의 재현성을 확인하기 위하여 Fig.5.3에서 제시한 정점에서의 수치실험 결과치와 관측치를 비교하였다. Fig.5.8 Fig.5.10은 P1 P7지점의 조석과 국립해양조사원(1999)에서 관측한 조석을 비교한 그래프이다. 해양조사원에서 조사한 지점(P8)은 본 모델의 P1지점보다 아랫부분에 위치한 지점으로 영역 바깥에 위치해 있다. 국립해양조사원 보고서에 의하면 조석형태수는 $F = \frac{O_1 + K_1}{M_2 + S_2} = 0.15$로 반일주조형이 탁월하므로 M_2, S_2의 영향이 조석의 주중을 이루는 것으로 분석되었다. 본 모델에서는 M_2 분조만을 고려하였으며, 위치에 따라 다소 차이가 있으나 Fig.5.8 Fig.5.10에서와 같이 유사한 진폭과 주기의 형태 값을 나타냄을 알 수 있다. 이 결과 중에서 본 연구와 관계깊은 제덕만, 대곶도 주위, 곶도 및 수도 사이, 수도와 을미도사이의 지점인 P4, P5, P6, P7에서의 호안공사 과정에 따른 각 Case별 조위변화를 비교한 것이 Fig5.11 Fig5.14이다. 이들 해역에서는 근원적으로 조석에 의한 유동의 영향이 거의 없는 해역으로 조위도 공사과정에 따라 약간의 변화가 발생하는 것 이외에 특별한 현상은 나타

나지 않았다.

전반적으로 관측치 및 광역수치실험 결과와 잘 일치되는 것으로 평가되었으며, 세부역에서 파라메타의 조정을 통하여 개방경계에서의 입력자료를 통하여 각 Case별로 유동장을 재현한 결과는 Fig.5.15 Fig.5.23에 나타난 것과 같다.

즉, 각각에 대한 창조류, 낙조류, 잔차류의 계산 결과를 각 Case별로 제시하였다. 호안공사에 따른 해역경계와 유동장의 제약이 반영되여 재현되고 있음을 알 수 있다. 현장조건과 같이 호안공사 대상해역에서의 유동은 10cm/sec이하의 미미한 값을 가지며, 수로중앙에 가까워져야 100cm/sec에 이르게 되고 본 해역과는 상당한 거리에 위치하고 있다.

조석과 마찬가지로 P4, P5, P6, P7에서 2조석주기동안에 공사과정별 유속변화를 그래프로 비교한 것이 Fig.5.24 Fig.5.27과 같다. 대상역이 주흐름에서 벗어난 해역인 제덕만 내(P4지점)에서는 공사단계별로 큰 차이는 없으나 대곶도와 수도, 을미도에 이르는 입구역(P5 P7)에서 공사단계별로 다소 흐름의 강도에 변화가 있음을 나타내었다. P5지점은 Case 1지점보다 Case 2 및 Case 3에서 유속값이 미소하게 감소하고 있으며, P6과 P7지점은 유속이 1cm/sec 4cm/sec 정도가 증가하는 것으로 나타났다. 증가율은 10% 80%정도이며, 이것은 P5, P6, P7지점이 호안 설치로 인해 직접적인 영향을 받는 때문으로 판단된다.

한편, Case 1구간 호안공사에 대한 Case 2 및 Case 3구간 공사시의 유동장 변화를 상대적으로 비교한 결과는 Fig.5.28 Fig.5.31에 제시하였다. 전반적으로 유동장의 재현을 통해 가덕 수로 주 항로상에서는 유속의 변화는 거의 없으나 대상역인 투기장 B해역의 제덕만으로 향하는 수로 부근에서 약간의 유속 증가가, 투기장 A해역의 용원방향 수로에서는 상당한 증가가 나타났다. 잔차류의 경우에도 호안 건설로 인해 제덕만 및 용원의 통항로가 되는 수로에서는 유속이 다소 증가하는 것으로 분석되었다.

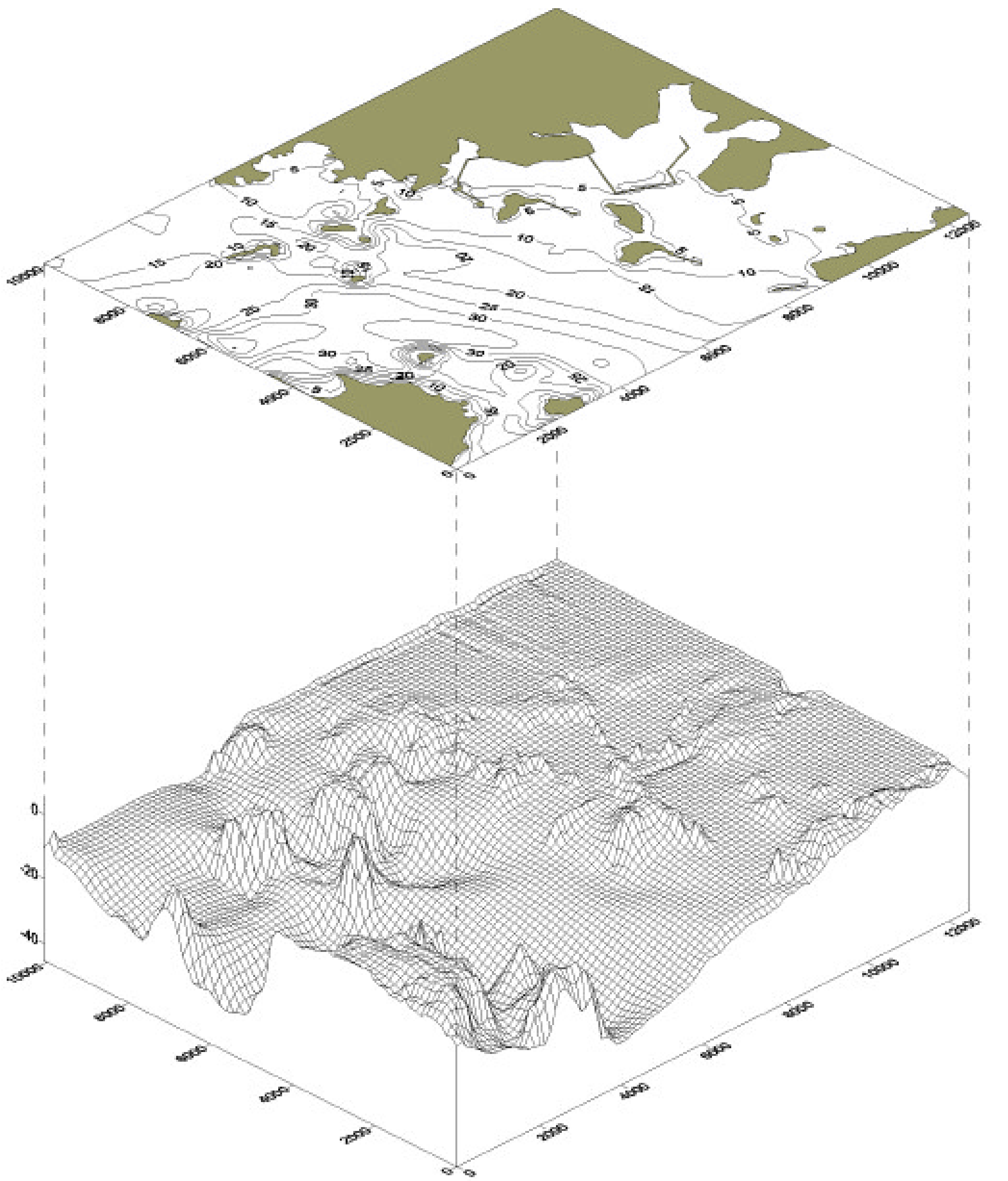


Fig.5.5 Bathymetry and bottom profile for the new harbor site

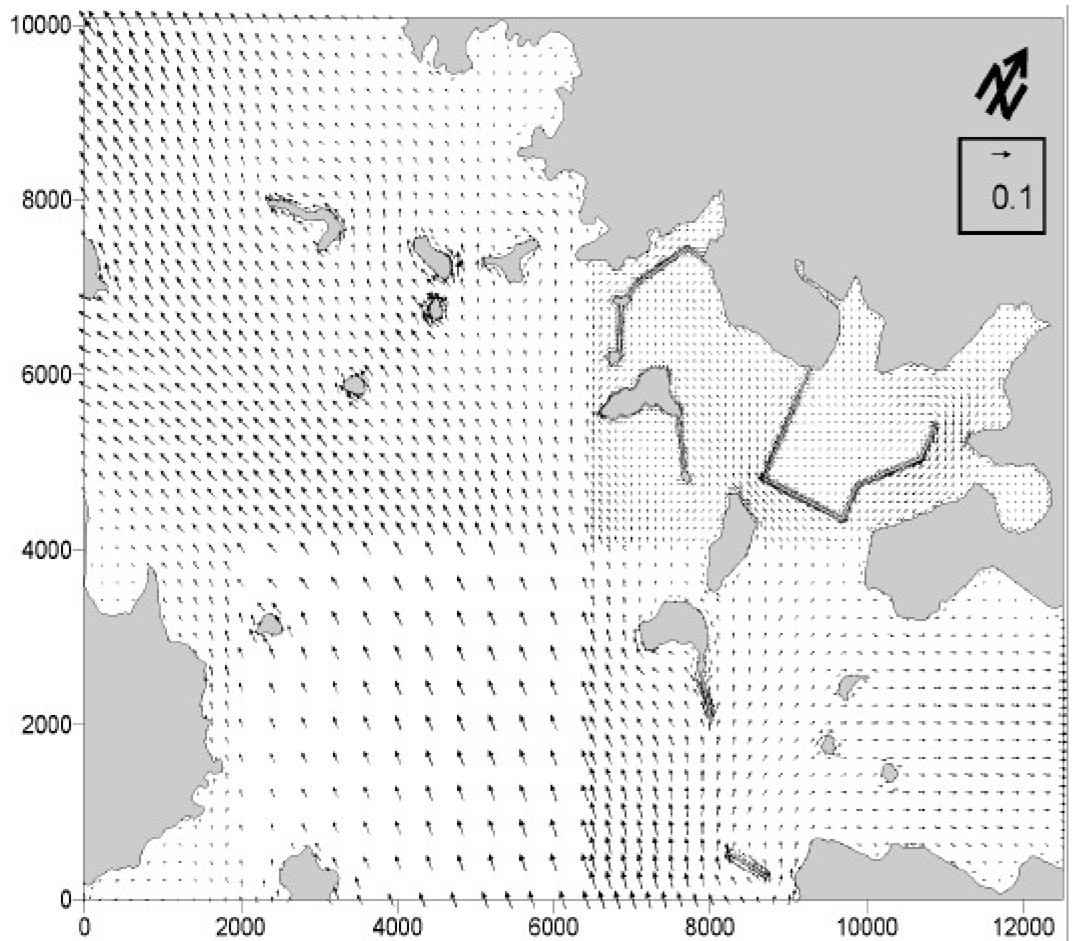


Fig.5.6 Computed tidal currents(maximum flood flow)

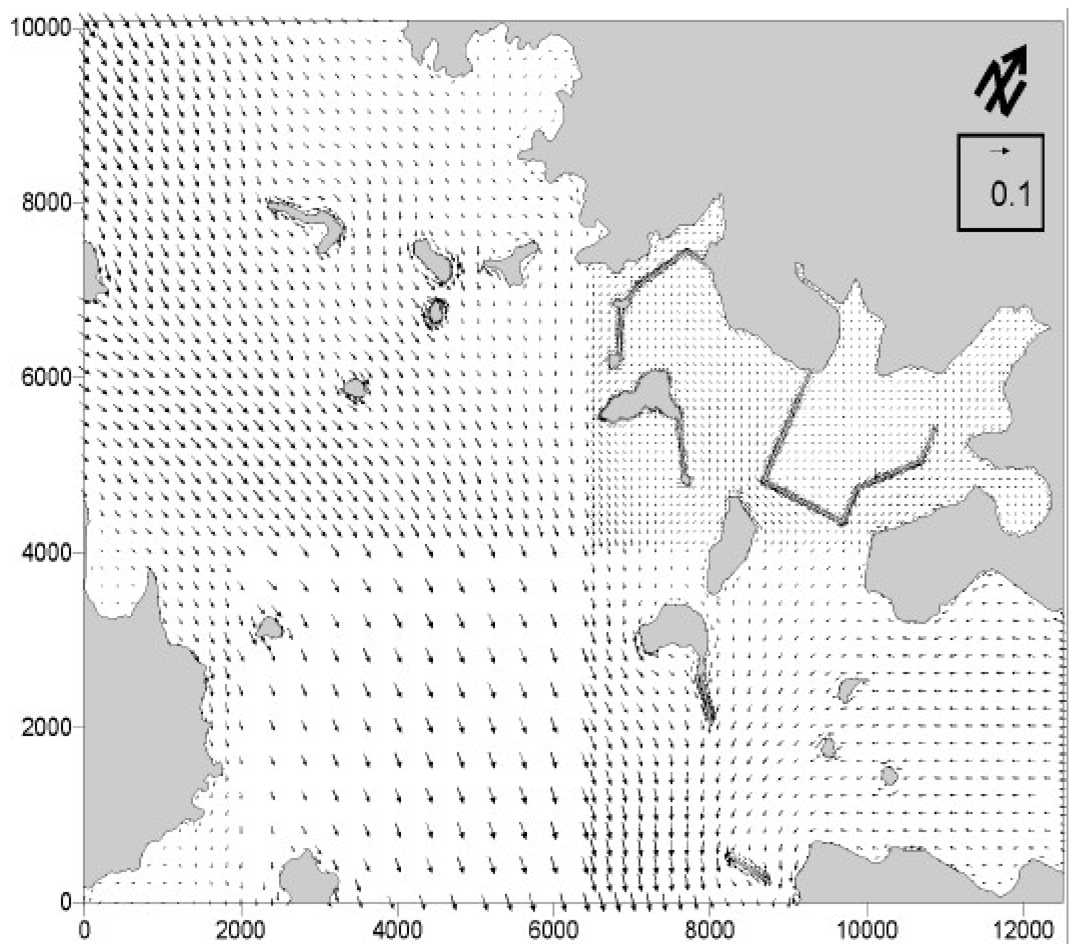


Fig.5.7 Computed tidal currentss(maximum ebb flow)

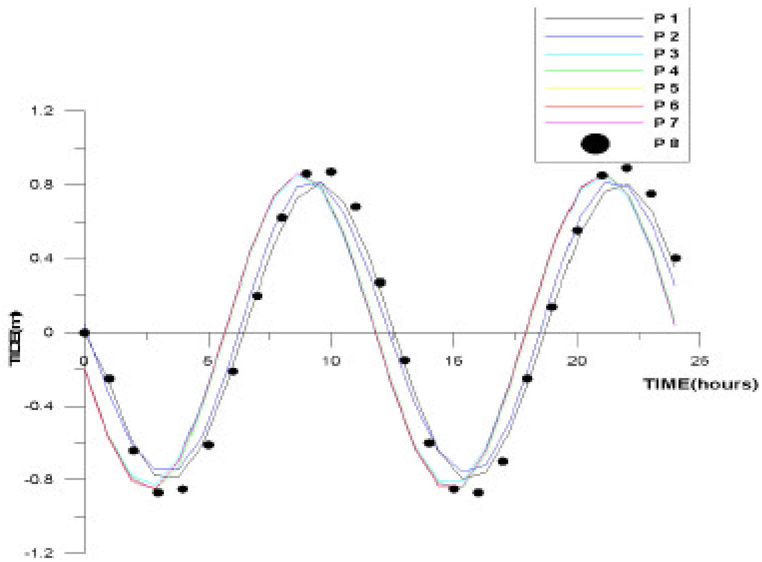


Fig.5.8 Comparison of observed and calculated tides for the selected stations(Case 1)

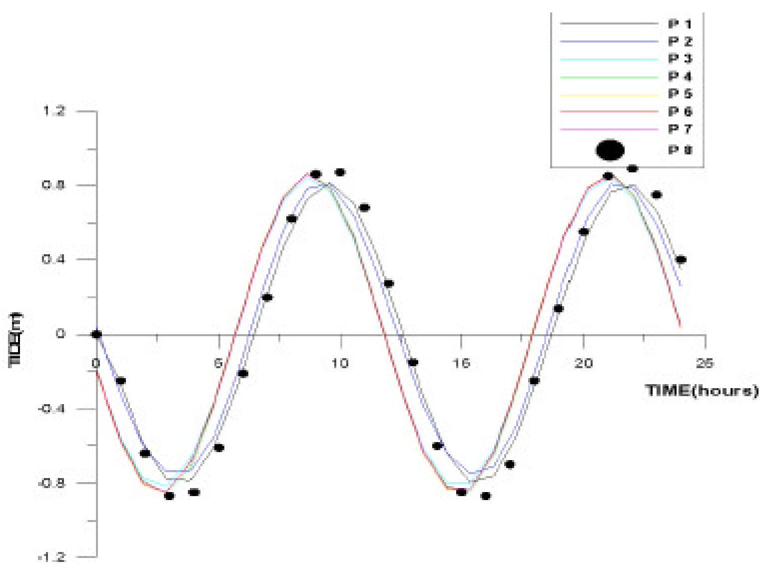


Fig.5.9 Comparison of observed and calculated tides for the selected stations(Case 2)

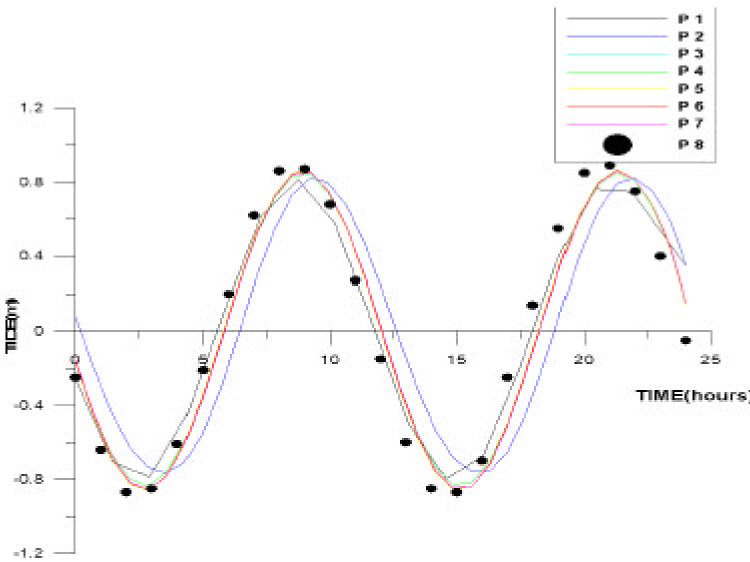


Fig.5.10 Comparison of observed and calculated tides for the selected stations(Case 3)

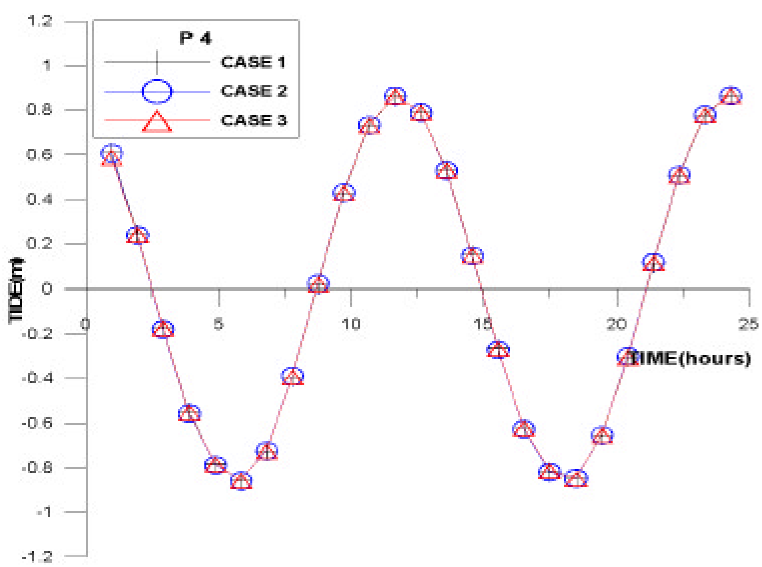


Fig.5.11 Computed tides at station P4 for each Case

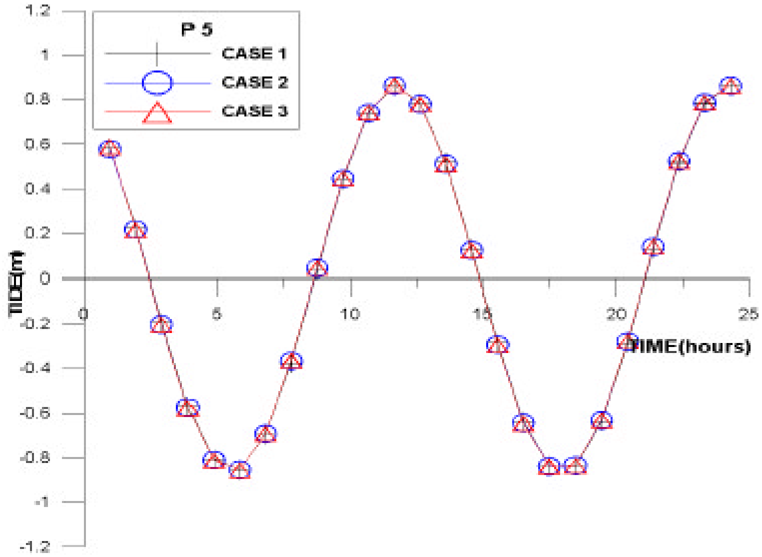


Fig.5.12 Computed tides at station P5 for each Case

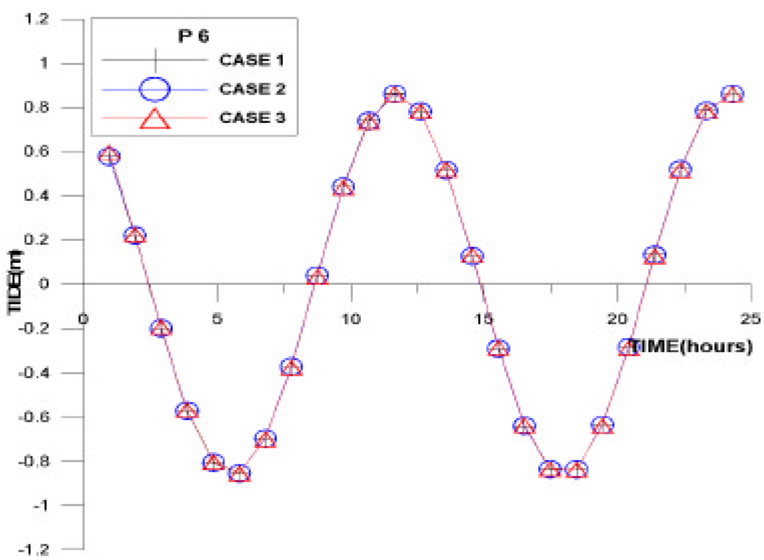


Fig.5.13 Computed tides at station P6 for each Case

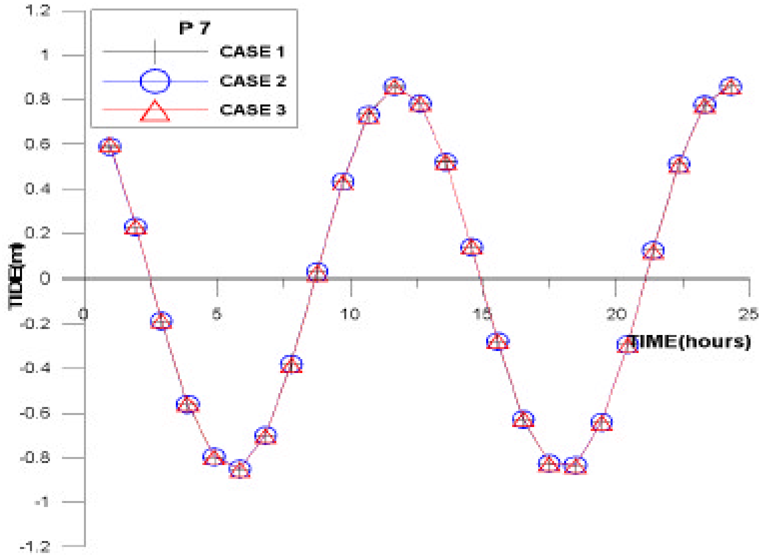


Fig.5.14 Computed tides at station P7 for each Case

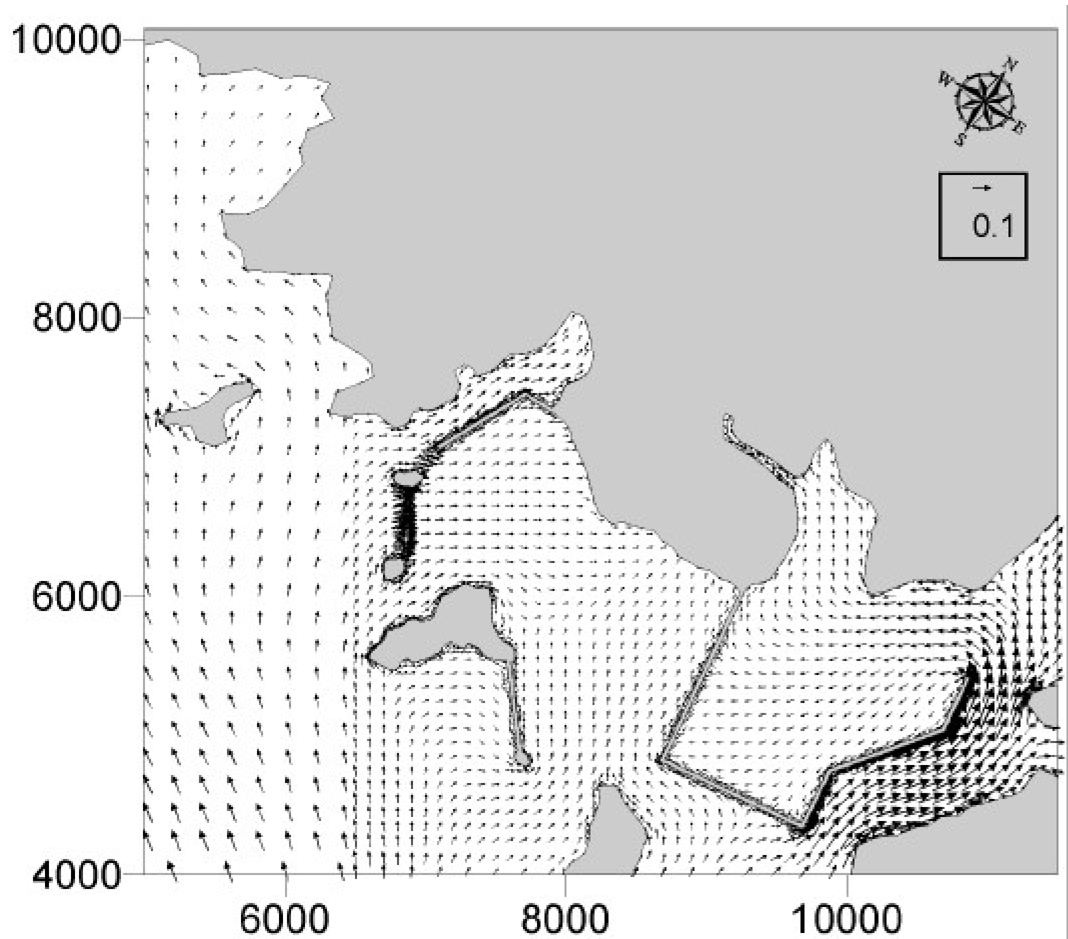


Fig.5.15 Computed tidal currents (Case 1, maximum flood flow)

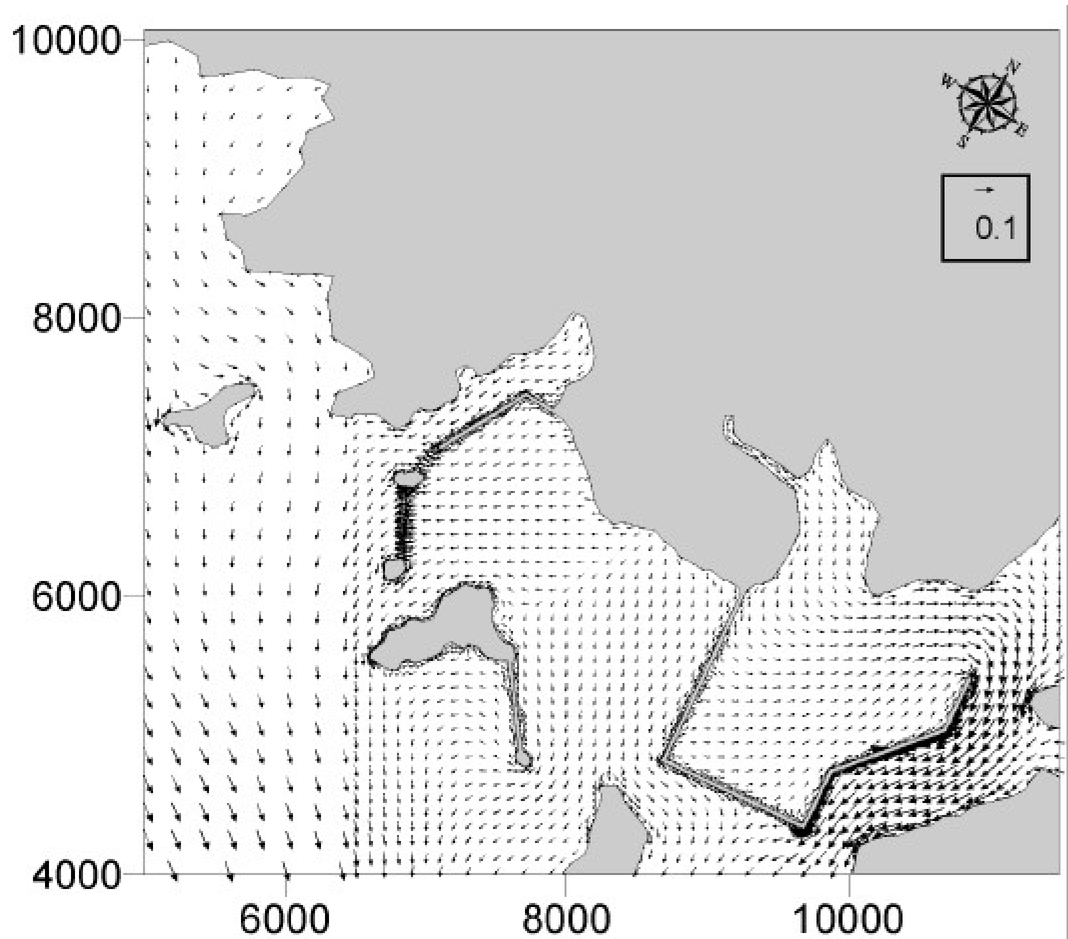


Fig.5.16 Computed tidal currents(Case 1 maximum ebb flow)

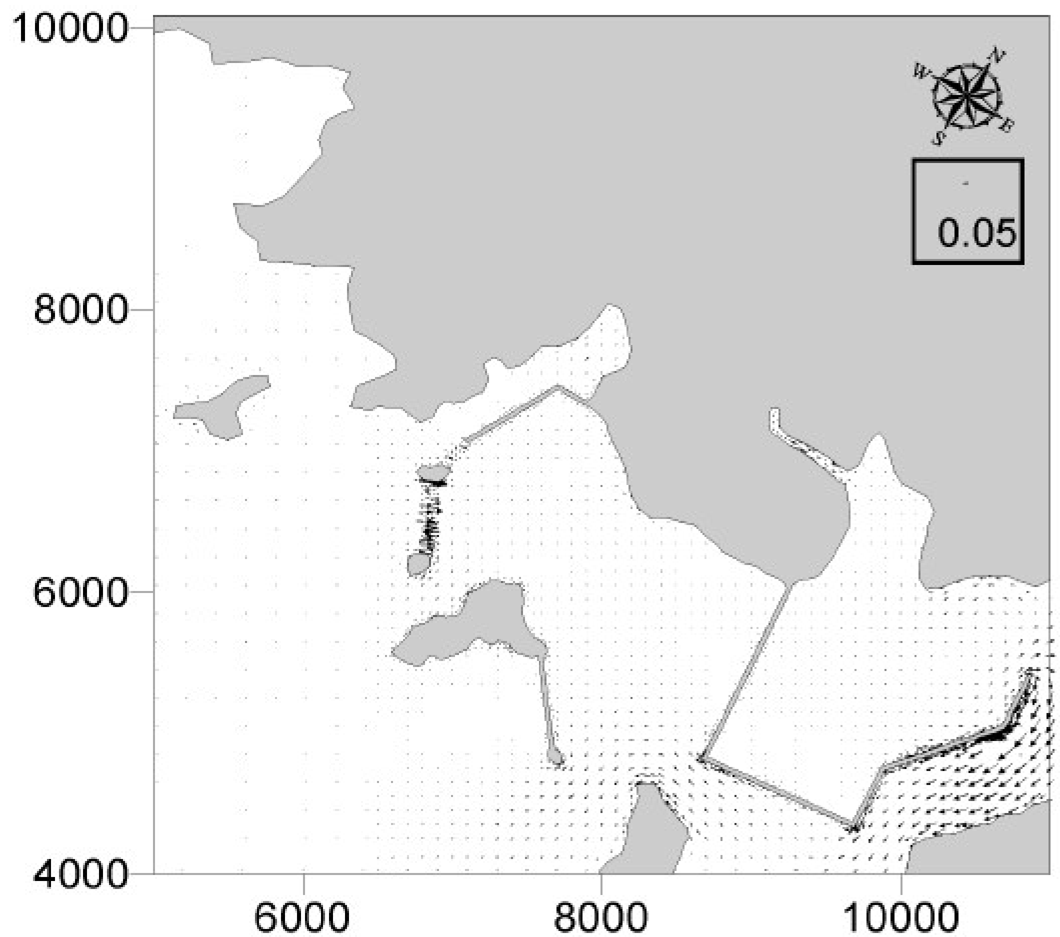


Fig.5.17 Residual currents for Case 1

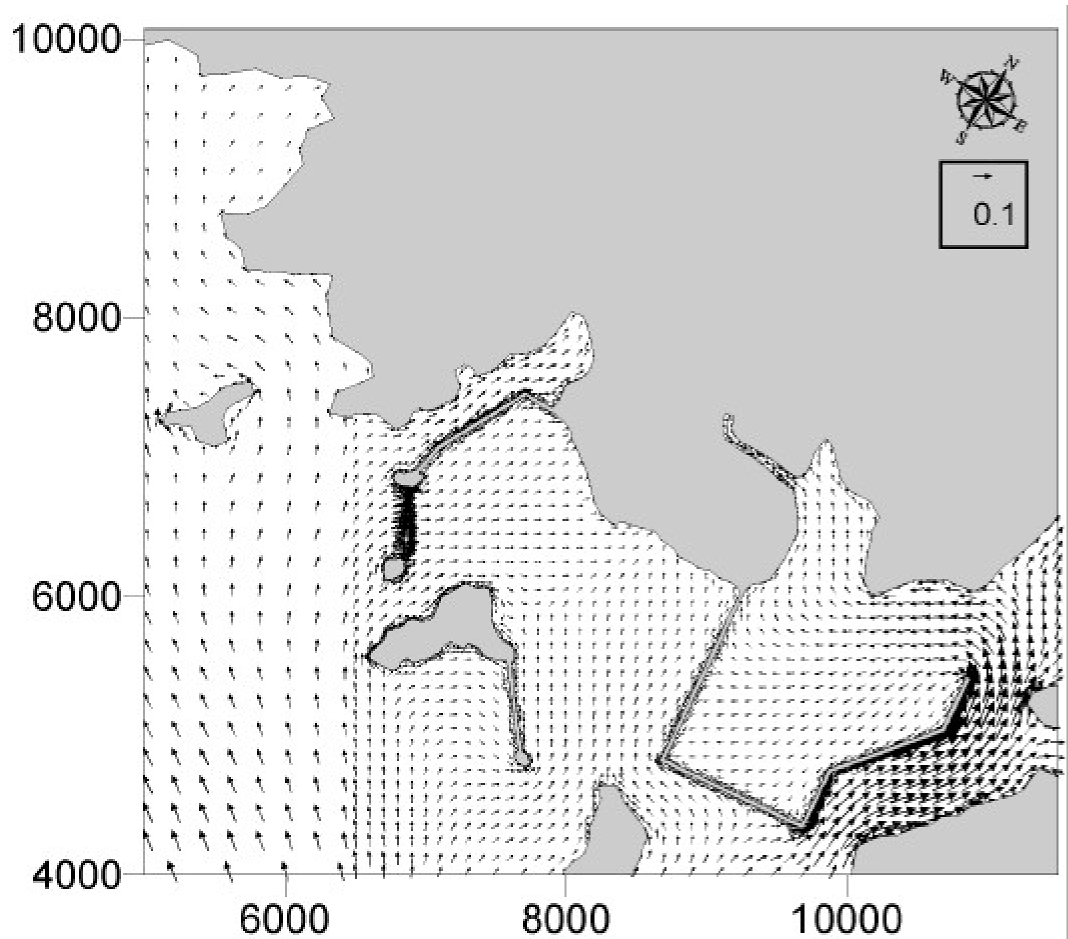


Fig.5.18 Computed tidal currents (Case 2, maximum flood flow)

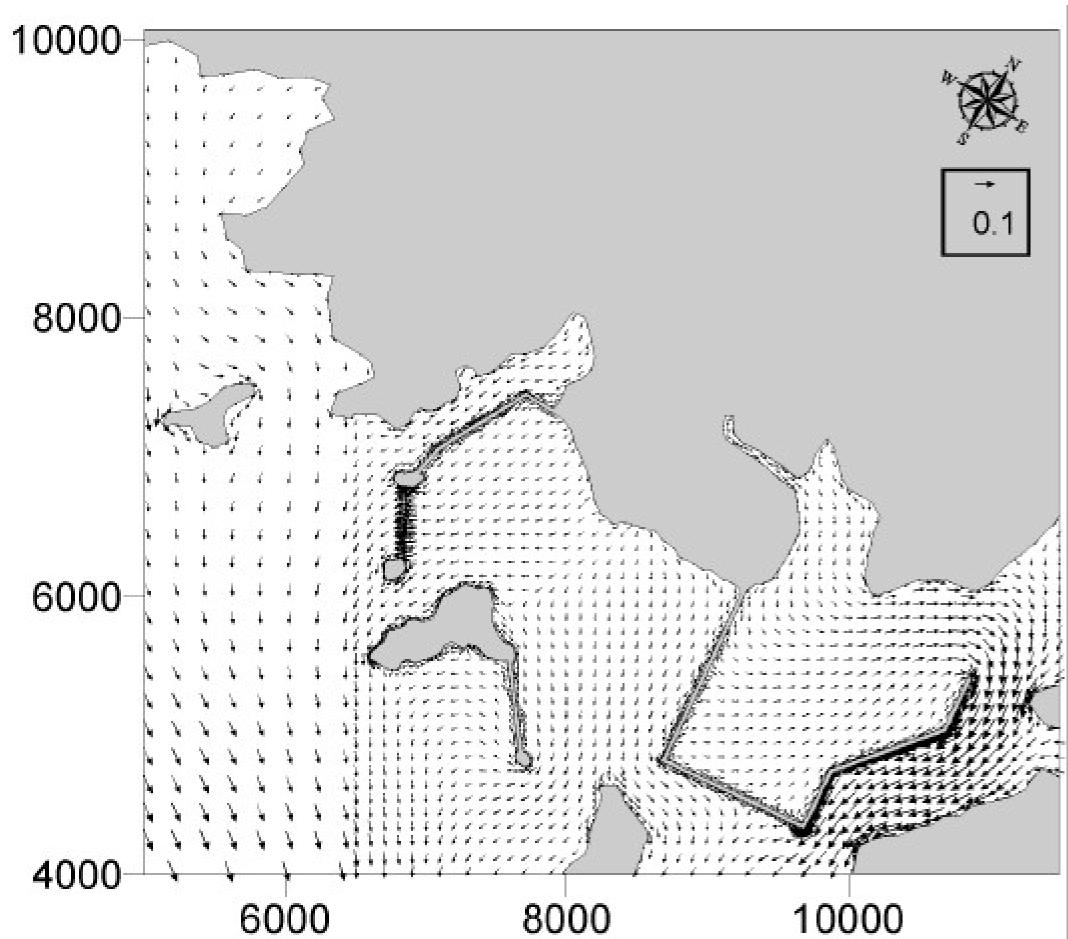


Fig.5.19 Computed tidal currents(Case 2, maximum ebb flow)

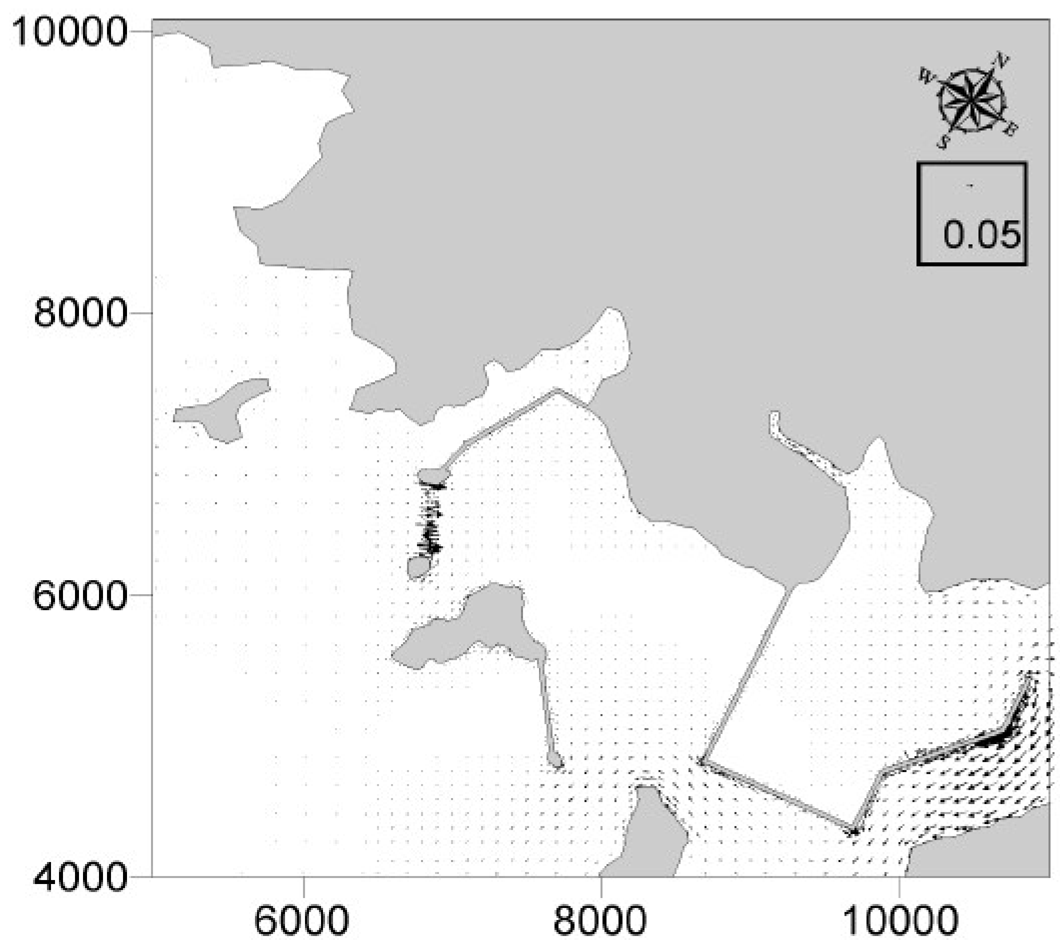


Fig.5.20 Residual currents for Case 2

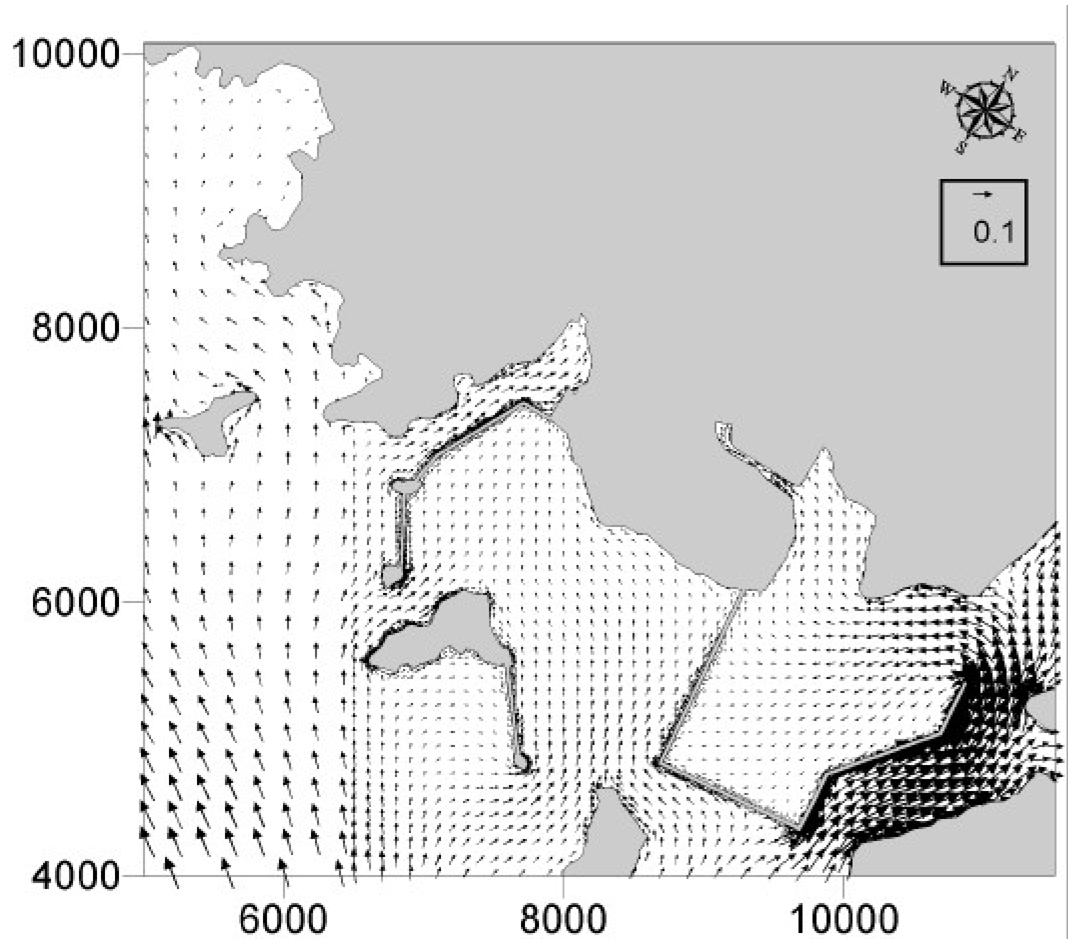


Fig.5.21 Computed tidal currents (Case 3, maximum flood flow)

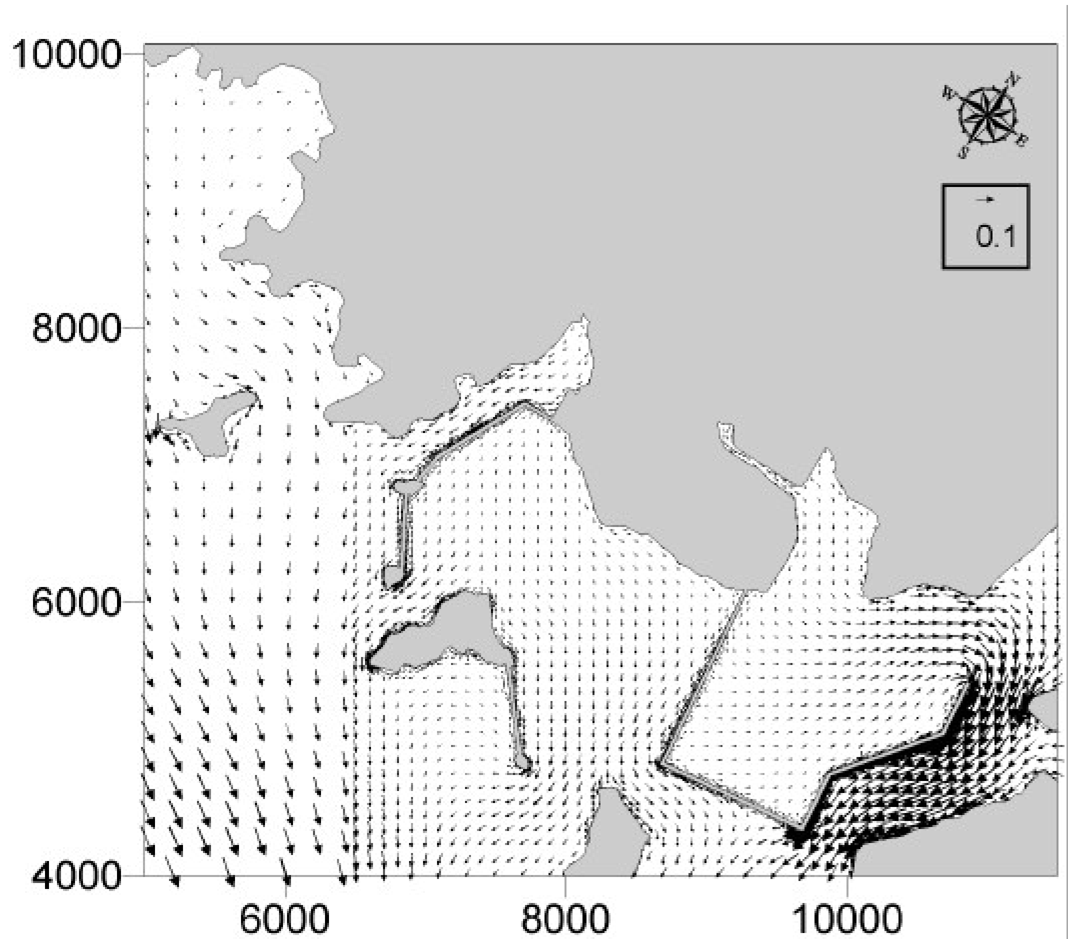


Fig.5.22 Computed tidal currents(Case 3, maximum ebb flow)

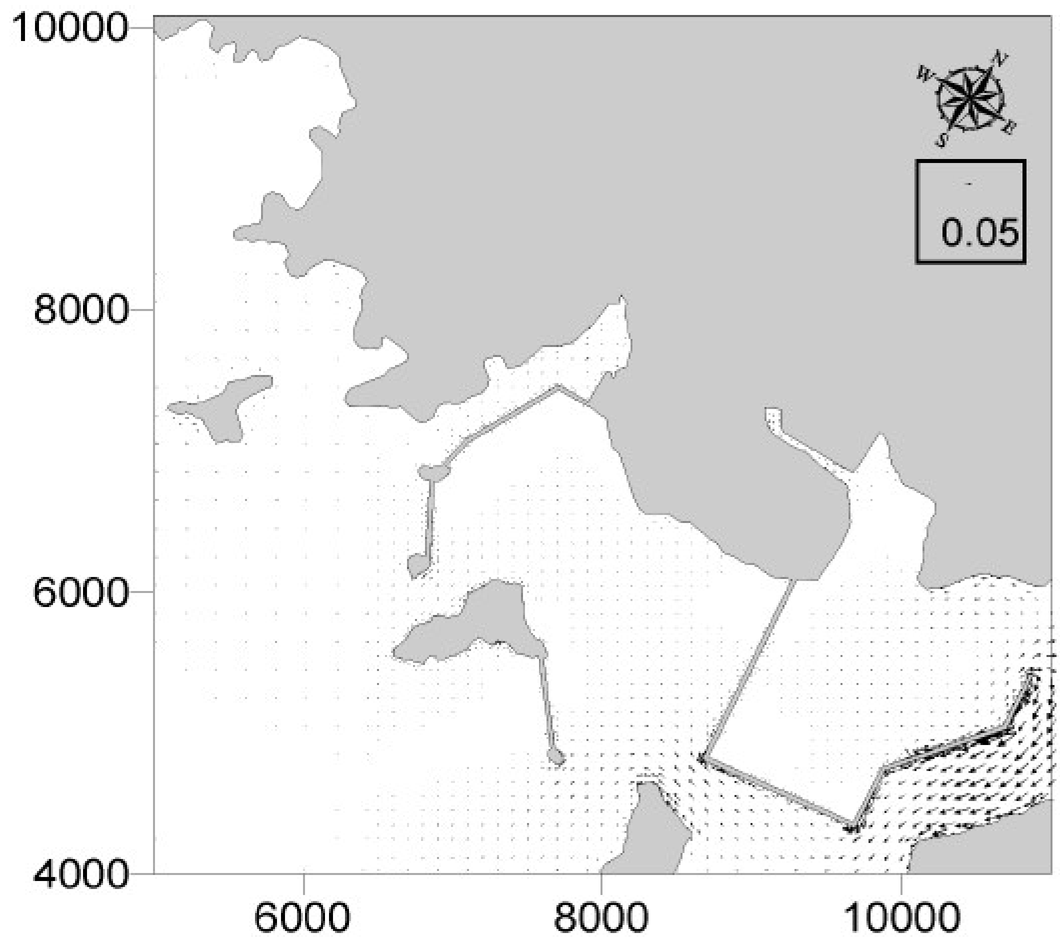


Fig.5.23 Residual currents for Case 3

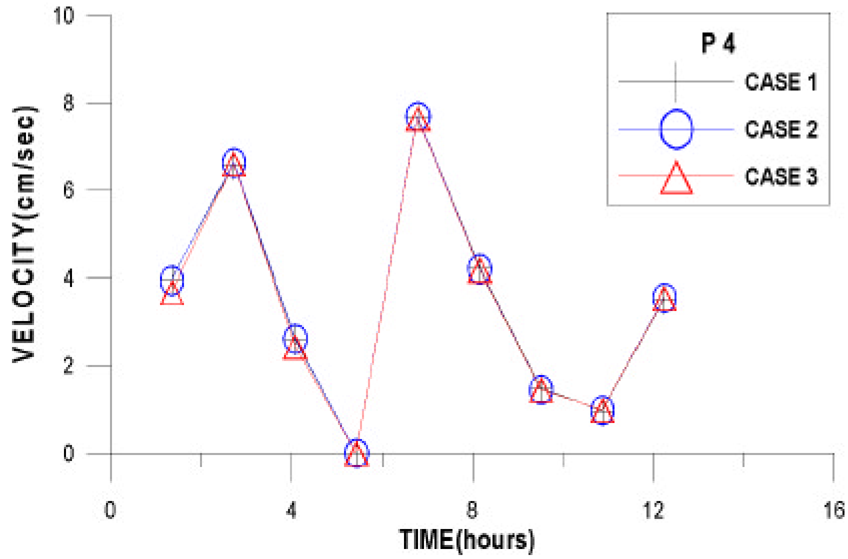


Fig.5.24 Comparison of velocities with respect to tidal period at station P4

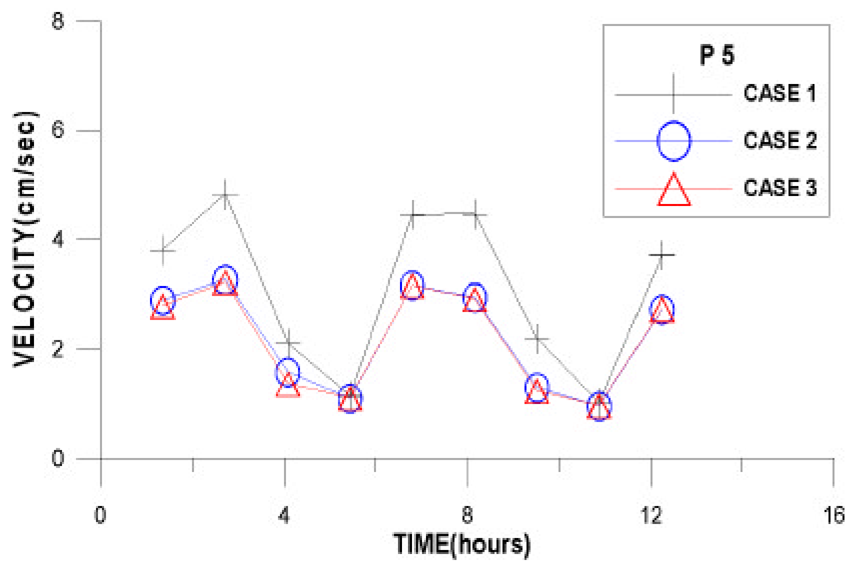


Fig.5.25 Comparison of velocities with respect to tidal period at station P5

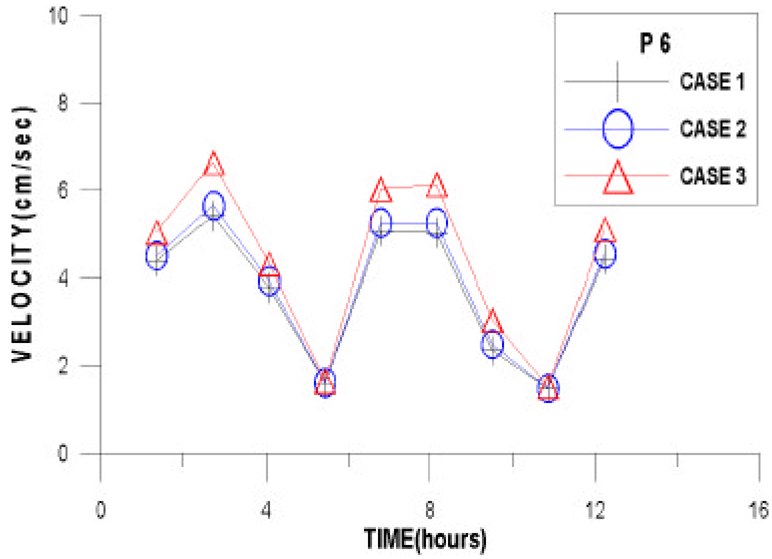


Fig.5.26 Comparison of velocities with respect to tidal period at station P6

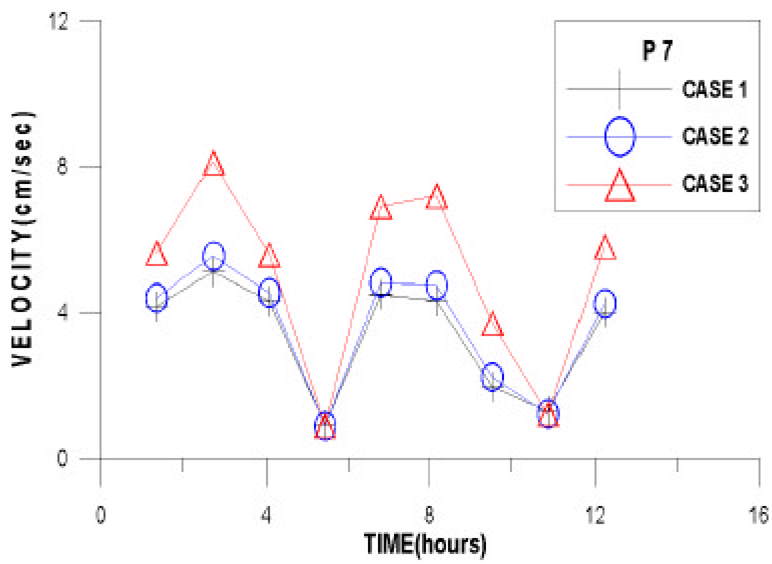


Fig.5.27 Comparison of velocities with respect to tidal period at station P7

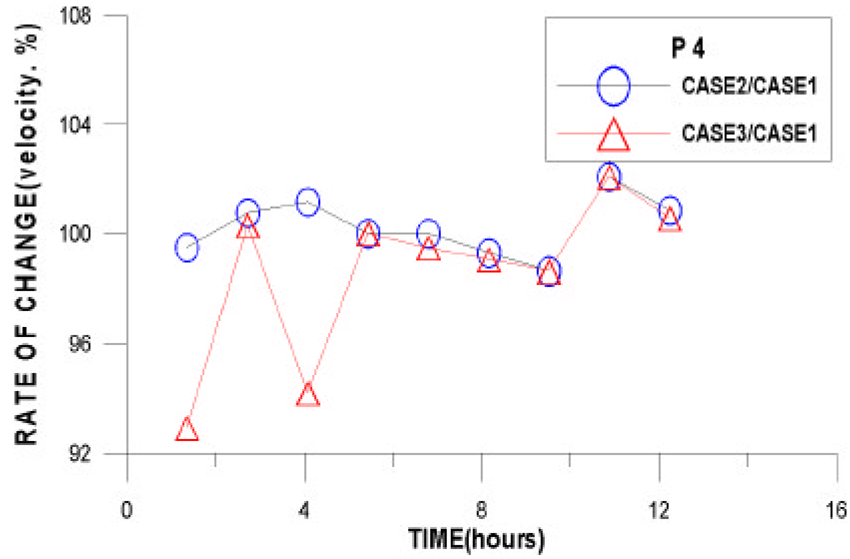


Fig.5.28 Rate of change of current velocities with respect to tidal period at station P4

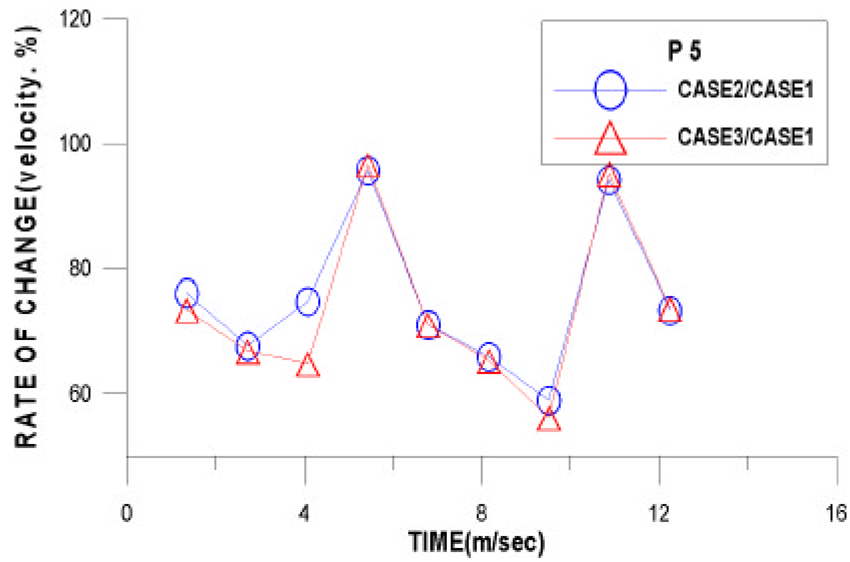


Fig.5.29 Rate of change of current velocities with respect to tidal period at station P5

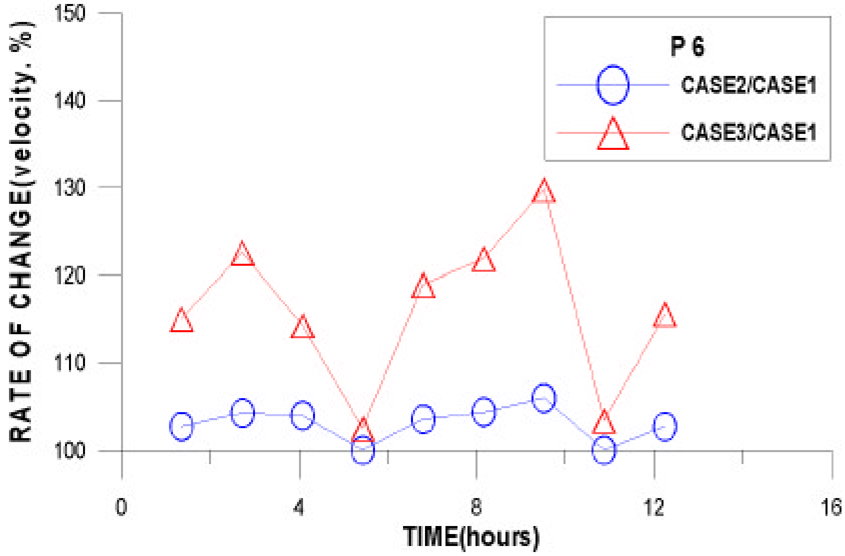


Fig.5.30 Rate of change of current velocities with respect to tidal period at station P6

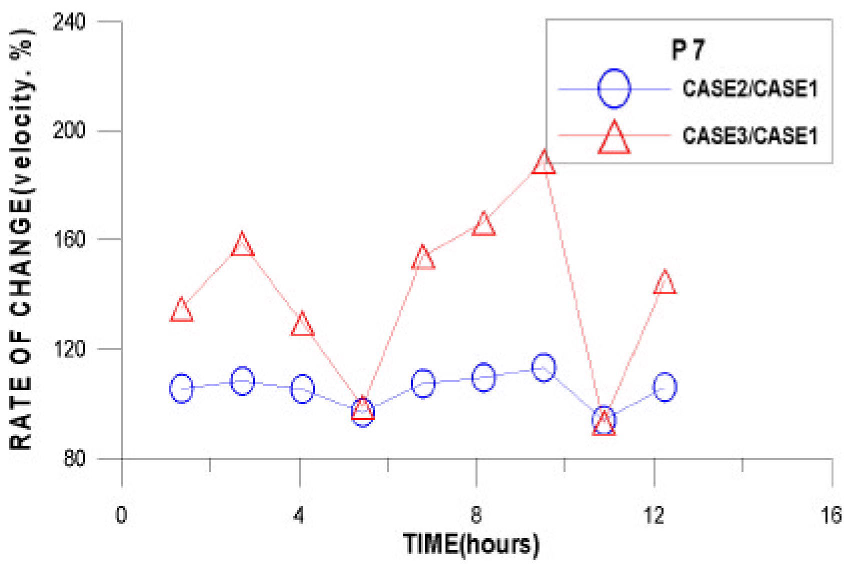


Fig.5.31 Rate of change of current velocities with respect to tidal period at station P7

5.3.2 오염물 확산 시뮬레이션

호안의 단계적 공사로 인한 해양수질에 영향을 미칠 환경영향 요소는 호안공사시 사석투하로 인한 부유물질(SS)의 발생이며, 이런 부유물질(SS)의 영향권의 범위를 부유물 확산 수치모형실험을 통하여 예측하였다. 여기에서 사용하는 유동장은 앞절에서 분석한 유동장 시뮬레이션 실행결과이다. 본 부유물 확산 수치모형은 공사시 사석투하공사로 발생되는 부유물질에 의한 오염확산 형태를 파악함에 있어 선 수행된 해수유동모형실험에 의한 조류 등 해수의 유동장 결과를 부유물 확산 수치모형의 기본입력자료로 구성하였다. 물질확산의 예측에 있어서, 확산물질은 염분과 같이 보존성물질이 있는가 하면, 대부분의 유기물・무기물에서 볼 수 있듯이 이류・확산의 과정 중에 물질 자체가 분해 또는 합성되어 증감하는 비보존성인 것이 있다. 물질확산을 보존성 물질로 가정해서 계산한다는 것은 대부분의 해수 중 환경인자가 비보존성 물질의 성질을 가지고 있는 점을 고려하면 실제 현상을 정확히 재현할 수 있다고 보기는 어렵다. 그러나 분해・합성 등의 복잡한 기구를 제외하고는 보존성 물질로서의 이류・확산은 물질확산의 기본량이라 말할 수 있다. 이러한 이유로 해역의 수질예측에는 보존성 물질의 확산이 빈번하게 이용되고 있다. 주 대상으로 하는 공사로 인한 부유토사(SS)는 침강과 재부상의 복잡한 기구를 가지고 이류・확산될 것으로 생각되나, 분해・합성 등의 기구에 의한 변성은 적을 것으로 생각하여 부유토사 확산의 기본량을 추정하기 위한 모델로서 보존성 물질의 확산모델을 사용한다. 확산실험은 공사시 발생되는 부유토사가 이 해역의 부유토사 농도의 증가에 얼마나 기여할 수 있는가를, 즉 가중치를 평가하기 위한 것이다. 공종에 따라 예상될 수 있는 정상시의 부유토사 부하량과, 홍수 및 폭풍 등의 최악의 조건에 대한 부하량을 구분지어 설정하여야 하나 본 연구에서는 공사단계별 적용 공종에 대해 SS 부하량을 부가하는 것으로 하였다.

SS발생원 단위는 해저토질의 성상, 매립토 및 사석의 상태, 수심, 유속에 따라 달라지므로 일정한 원단위를 산정하는데 어려움이 있으므로 본 평가에서는 본 사업과 유사한 사업에서 사용된 원단위 및 일본 등에서 사용하고 있는 원단위와 방법을 참조하여 각 공종 중에서 사석공에 해당하는 SS발생원단위를 적용하기로 한다. 사석투하공사시의 SS발생원단위는 국내의 경우는 해양수산부에서 연구사업이 완료되는 내후년에 정리되므로 외국『관서국제공항 건설사업(일본) 환경영향평가서』를 참고로 하여 사석공 원단위 1.0kg/㎥을 적용하였다. 오염부하시 오염부하형태는 연속방류형태로서 산정하였으며, 공사단계별 즉, Case 1, Case 2, Case 3로 나누어, 각각의 경우에 오탁방지막 설치 전·후로 구분하여 수행하였다. 산정기간은 지역특성 및 오염원 특성을 고려하여 15조석주기로 하였으며, 본 해역의 조석특성을 고려하여 평균대조 실험자료로부터 고려된 유동자료로부터 체류시간에 따른 확산형태에 대해 검토가 이루어졌다.

1) 오탁방지막 설치 전 오염확산

공사로 인한 부유토사의 확산에 의한 영향범위를 파악하기 위한 확산 수치모형 계산결과를 공사의 단계별로 Fig.5.34 Fig.5.45에 제시하였다. 그림은 오염부하물질 SS 발생조건을 고려하여 계산한 것으로 주변 해역의 수질이 평형을 이루는 것으로 간주되는 15조석째의 계산결과와 확산되는 양상을 파악하기 위하여 1, 5 및 10조석째의 계산결과를 같이 도시하였다. Fig.5.34 Fig.5.37는 실험안 Case 1에 대한 SS확산형태를 나타낸 것으로 1조석 주기 후에는 제덕만 내측의 호안에서 북측방향으로 제덕만 전체해역, 남쪽방향으로 호안 끝단에서 약 358m 부근인 대곶도의 북단 근처까지 1mg/l의 등농도선이 나타나고 있다. 5조석주기 이후에는 그 범위가 수도 북단에서 삼포남단까지에 이르며, 10조석 이후에는 수도동단-곶도북단-우도에, 15조석주기 이후에는 남산말-수

도와 을미도 중간-곶도-음지도에 이르는 영역으로 확대된다. 실험안 Case 2에 대한 SS확산형태는 Fig.5.38 Fig.5.41에 제시한 바와 같이 제덕만 Case 1을 완료하고 Case 2를 진행하는 것으로 하여 1조석주기에 대곶도 남단 50m에서 삼포 남쪽단 부근까지, 5조석주기에 수도북단-곶도-우도-명동의 영역까지, 10조석주기에 수도동단-곶도-우도남단-명동까지, 15조석주기에는 남산말-수도와 을미도 중간-곶도남단-우도남단-명동남서단에 등농도 선이 이르게 된다. Fig.5.42 Fig.5.45과 같이 Case 1구간을 완료하여 Case 2구간에 진행되는 사석공의 Case 3는 사업대상역에서는 대곶도와 곶도를 연결하는 선상에서 확산되어가는 양상을 보이는데 1조석주기 후에는 수도 북서해안에서 삼포 남단까지 원형의 영역에 해당하며, 5조석주기 후에는 수도북단-우도-삼포를 연결하는 영역, 10조석주기 후에는 수도 동단-우도와 소고도 중간-명동을 연결한 영역으로, 15조석주기 후에는 남산-수도와 을미도 중간-토끼섬-소고도-명동남서단까지 연결한 영역으로 Case 1 및 Case 2 보다 약간 늘어난 영역이나 유사한 모양을 나타내고 있다. 제덕만 방파제의 북쪽의 경우에는 등농도선이 1mg/l이하로 나타났으며, 15조석주기 이후에도 2mg/l을 넘지 않는 것으로 나타났다. 이는 유동패턴 중에서Case 1구간 및 Case 2구간이 이미 체절 되었으므로 유동의 주 흐름은 이로 인해 차단되어 내측 수역에 그 영향이 미치지 못하기 때문으로 사료된다.

Fig.5.32 Construction work for revetment at the project site

Fig.5.33 Silt protector and revetment work at the project site

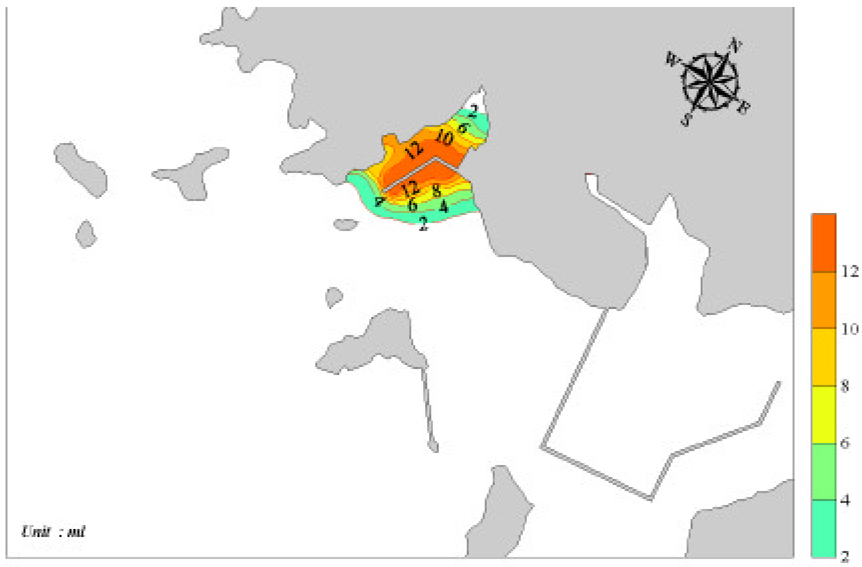


Fig.5.34 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 1 without silt protector

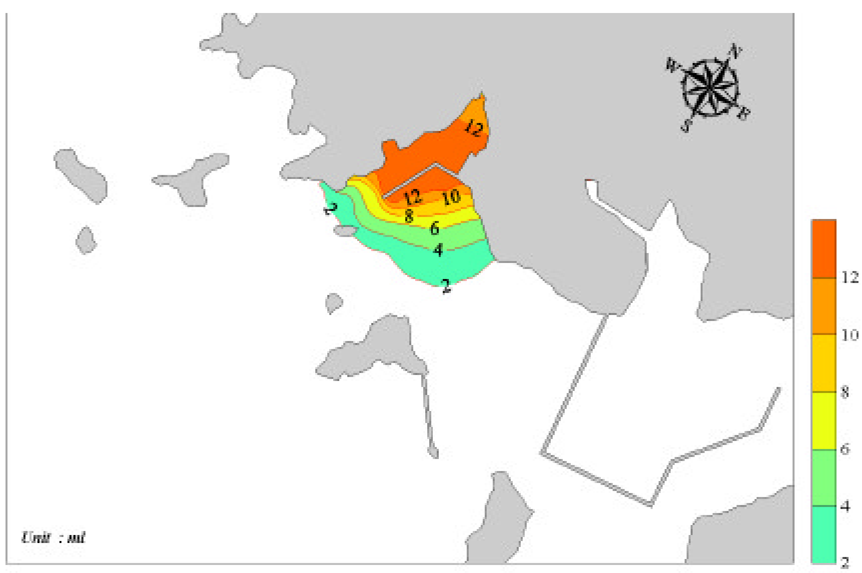


Fig.5.35 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 1 without silt protector

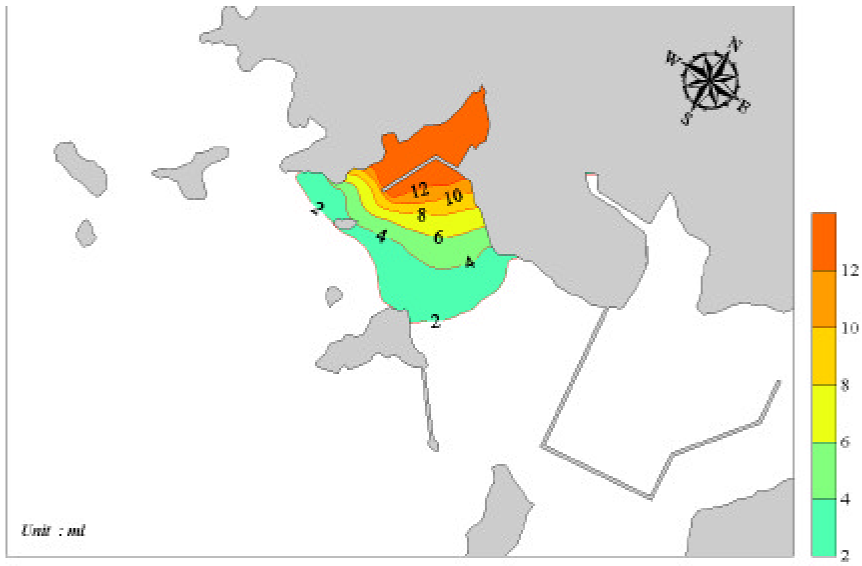


Fig.5.36 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 1 without silt protector

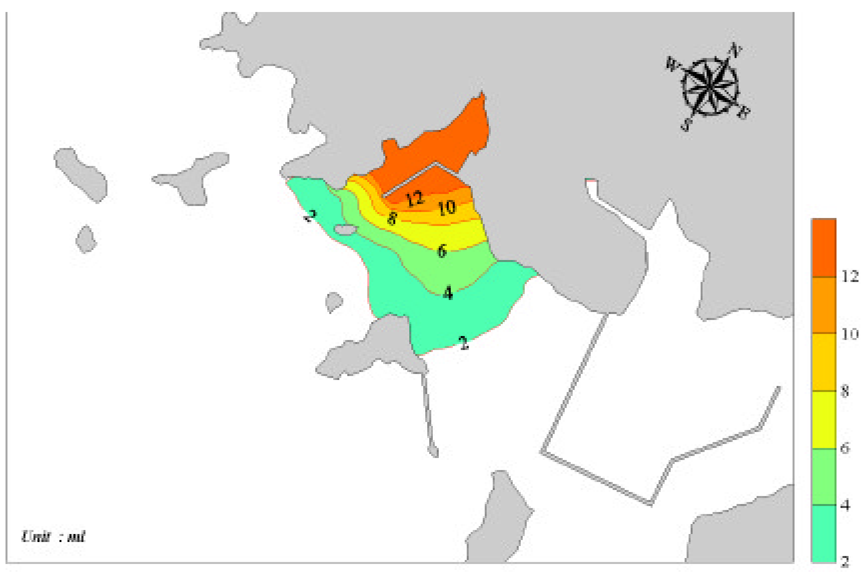


Fig.5.37 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 1 without silt protector

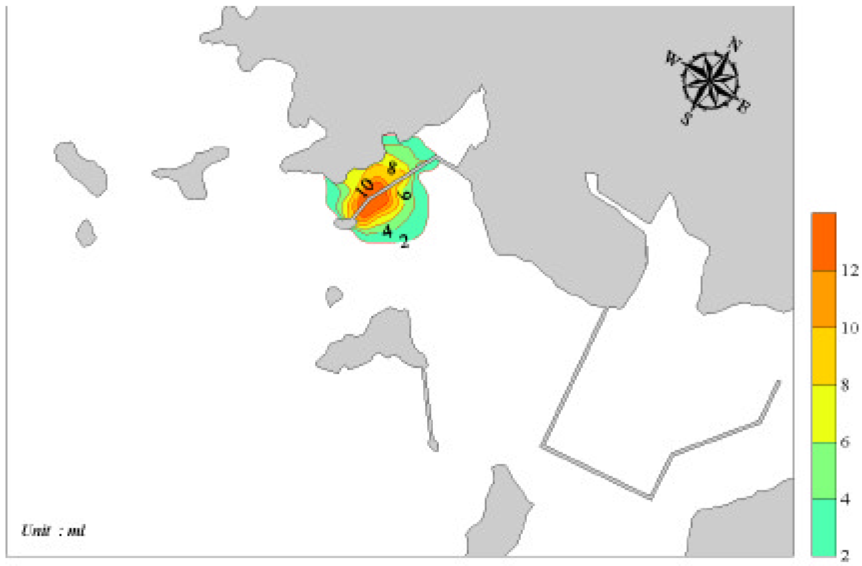


Fig.5.38 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 2 without silt protector

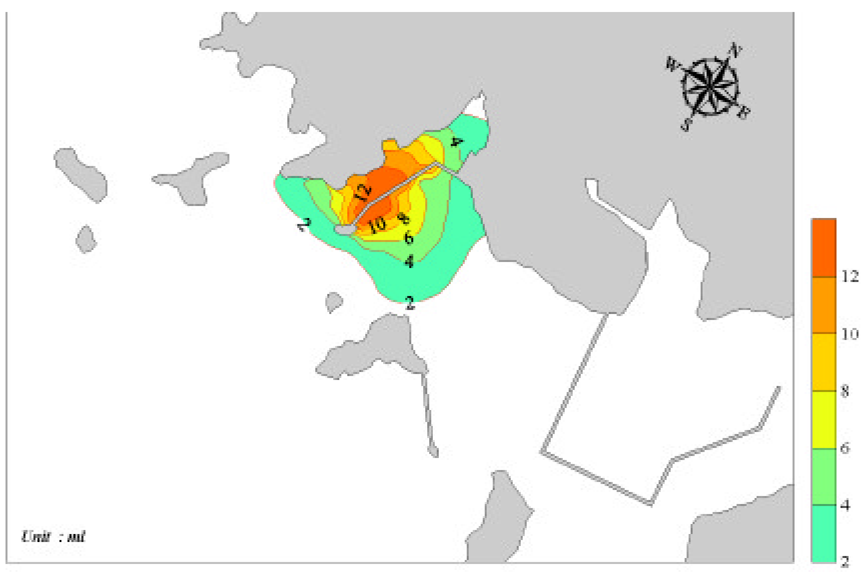


Fig.5.39 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 2 without silt protector

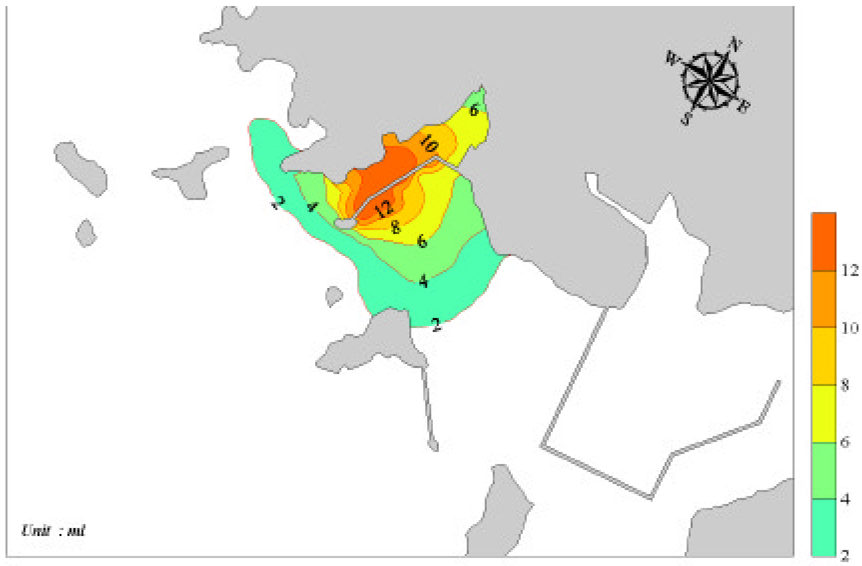


Fig.5.40 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 2 without silt protector

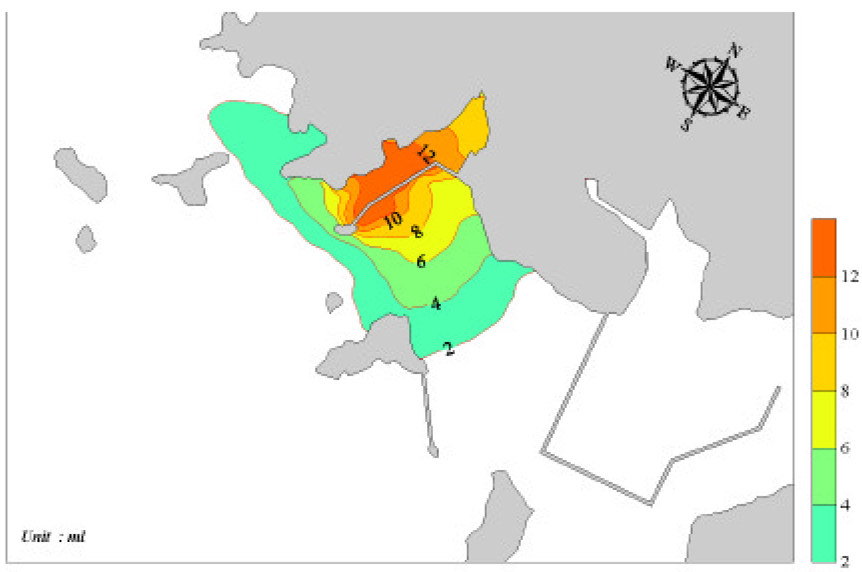


Fig.5.41 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 2 without silt protector

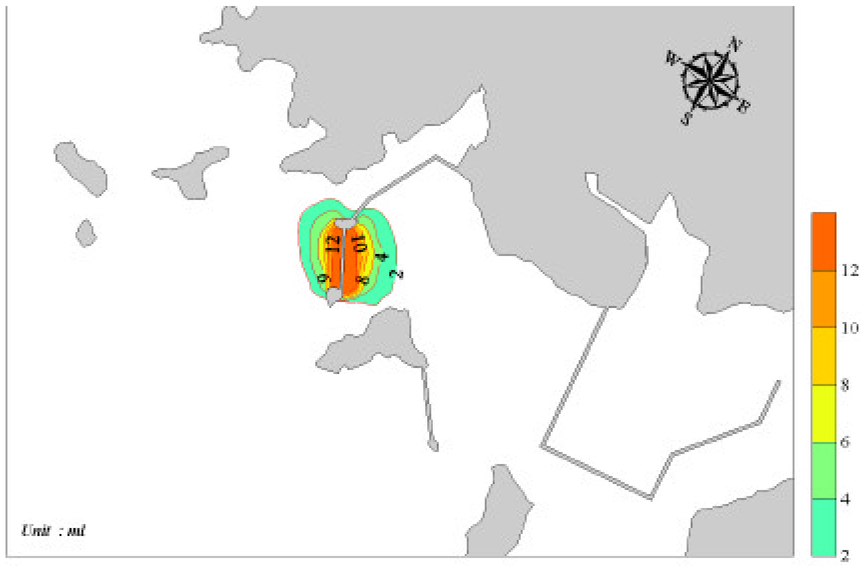


Fig.5.42 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 3 without silt protector

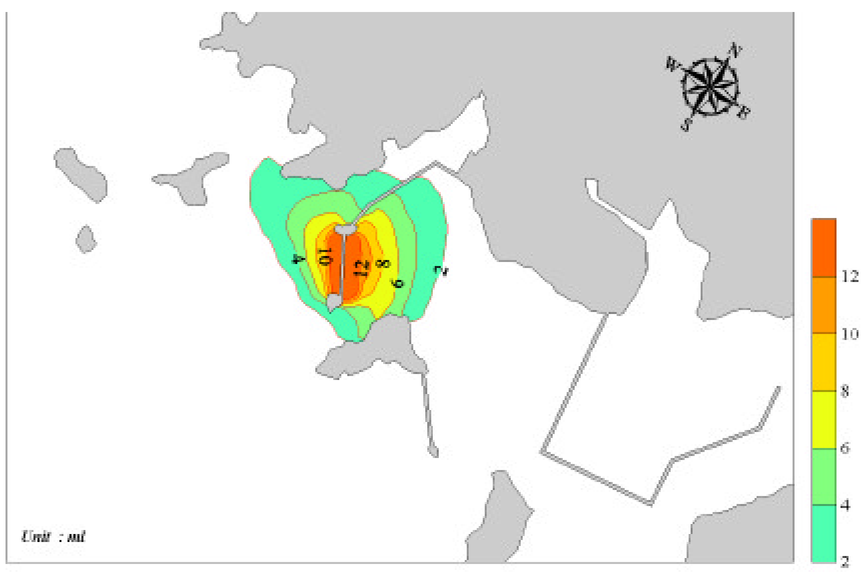


Fig.5.43 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 3 without silt protector

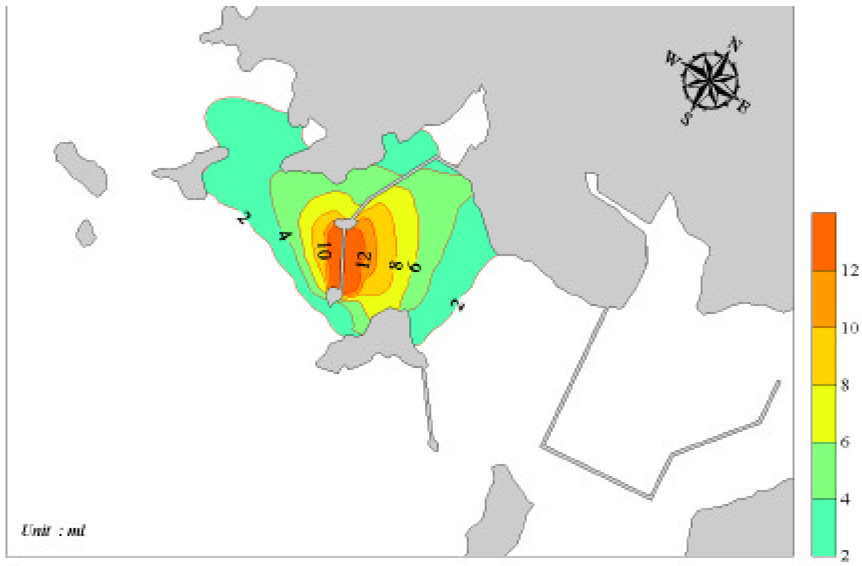


Fig.5.44 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 3 without silt protector

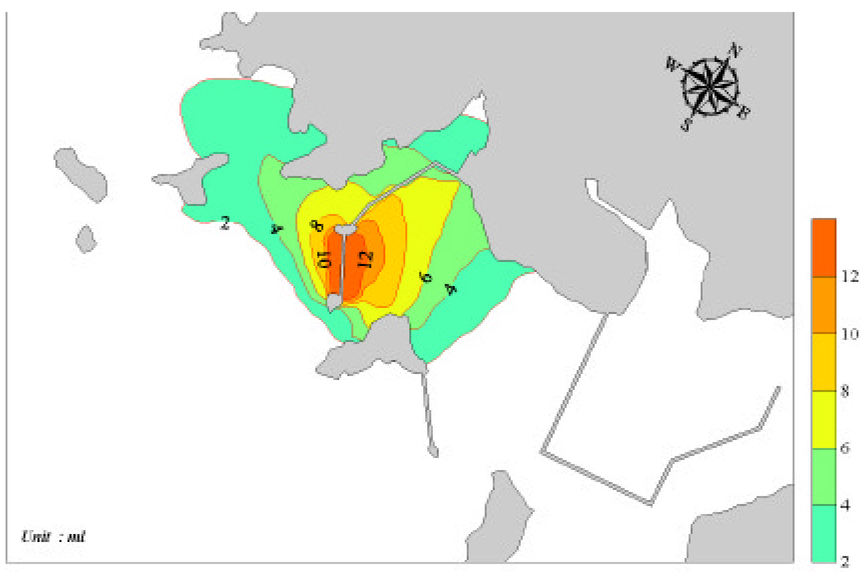


Fig.5.45 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 3 without silt protector

2) 오탁방지막 설치 후 오염확산

공사시행으로 인하여 SS가 발생, 공사지역 주변 해역에 대한 영향이 예상되므로 이에 대한 영향을 저감시키기 위해 부유물질 확산을 억제하는 방안을 적용하고자 한다. 실제 공사시 사후 환경영향평가 측면에서 현실성있는 시공계획에 따라 지속적으로 Monitoring하여 그 효율성에 대한 재검토를 실시하여야 할 것이지만 일반적으로 마지막의 효용은 기존의 방법으로 부유물질을 50% 경감시키는 것으로 현장에서 적용하고 있다. 오탁방지막의 현장 설치 모습은 Fig.5.32와 Fig.5.33과 같다. Fig.5.46 Fig.5.57 는 오탁방지막을 설치한 후, 각 단계별로 확산차단 효과를 나타낸 것이다. 각각의 경우 최대 중심농도는 저감효과로 의해 50% 이내로 적어지고 100m이상의 최대확산거리의 감소효과가 나타났다. Case 1의 경우, 남북쪽방향으로 약 100m, 동서쪽방향으로는 약 120m의 최대확산거리 감소효과가 나타났으며, Case 2의 경우, Case 1과 유사하게 서쪽방향으로 약 120m의 확산거리 감소를 나타내 보였고 섬과 호안의 연결로 인한 효과는 거의 무시할 정도로 적은 것으로 나타났다. Case 3의 경우, 저감전의 경우 1mg/l의 등농도선이 섬을 근접하고 있는 것을 알 수 있으나, 오탁방지막에 의한 저감 후의 경우, 0.1mg/l의 등농도선이 섬의 상단에 근접하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 기존 호안 끝단에서 남측해역으로 약 500m의 최대확산거리 감소효과가 나타났다.

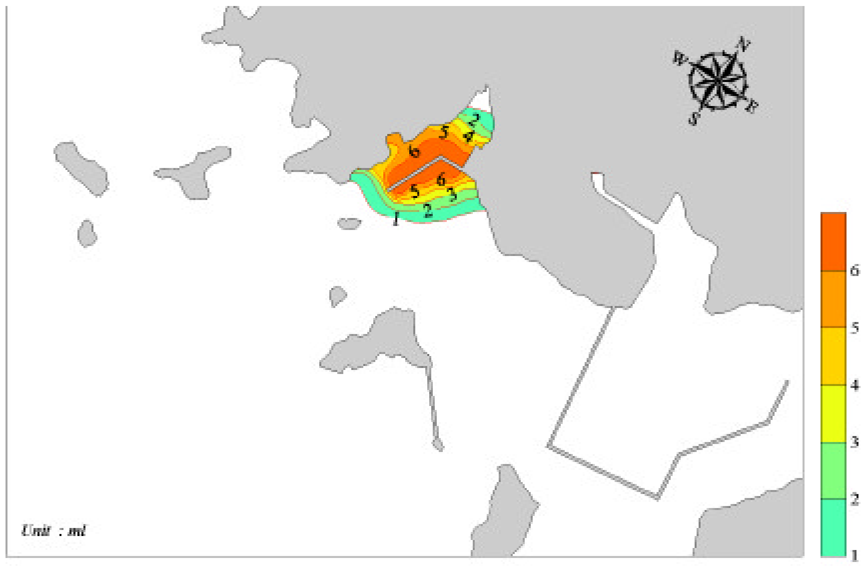


Fig.5.46 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 1 with silt protector

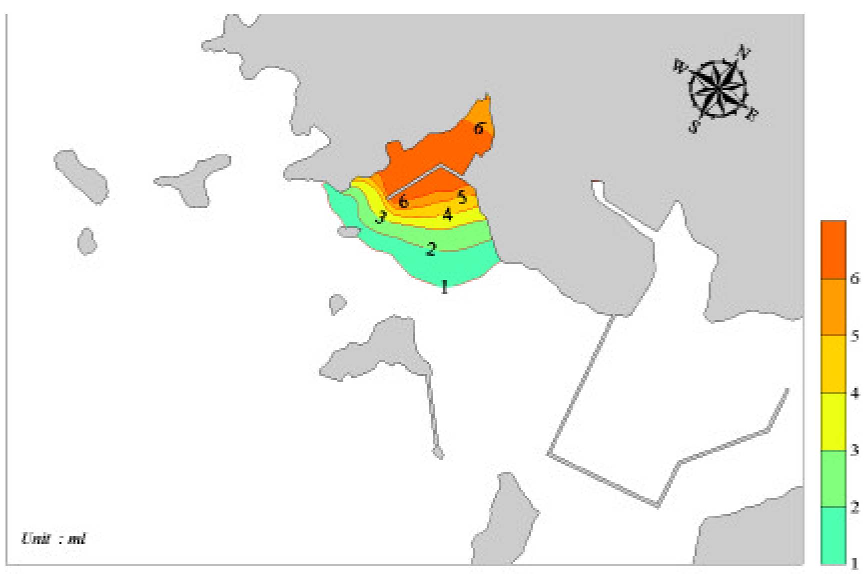


Fig.5.47 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 1 with silt protector

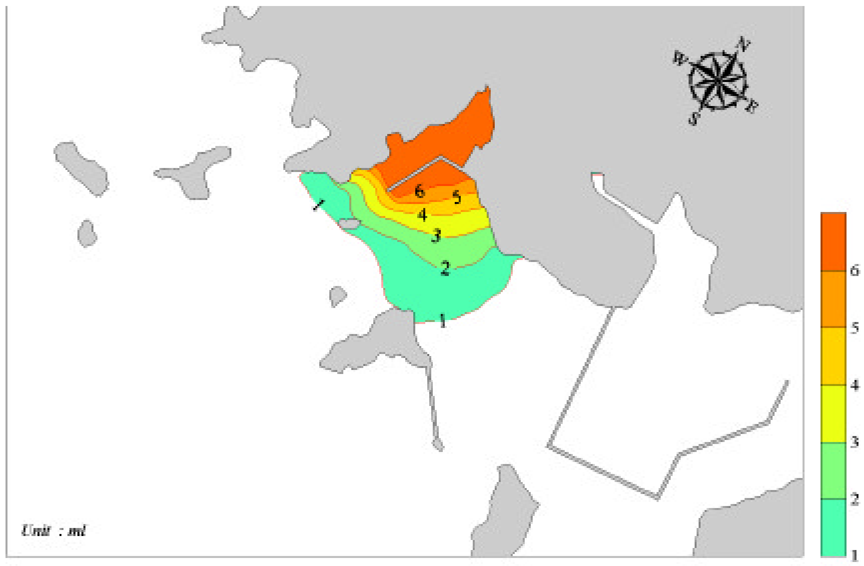


Fig.5.48 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 1 with silt protector

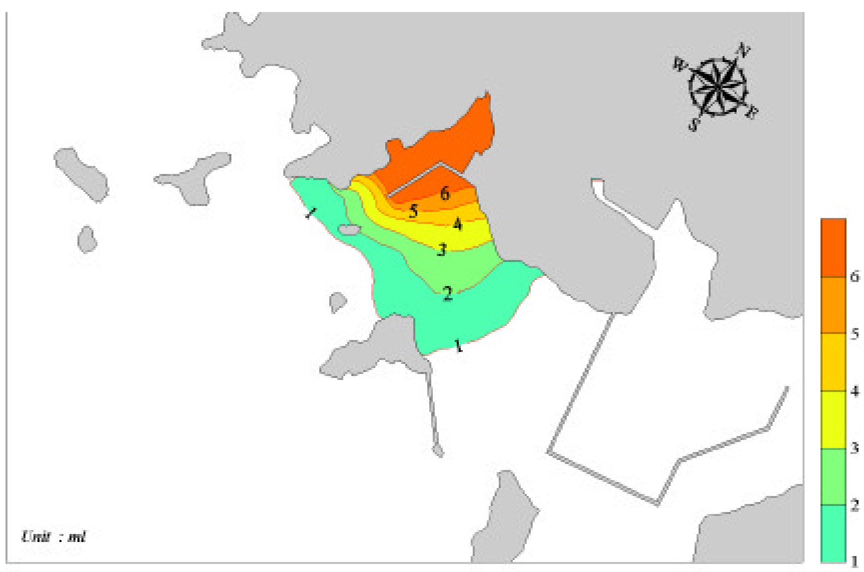


Fig.5.49 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 1 with silt protector

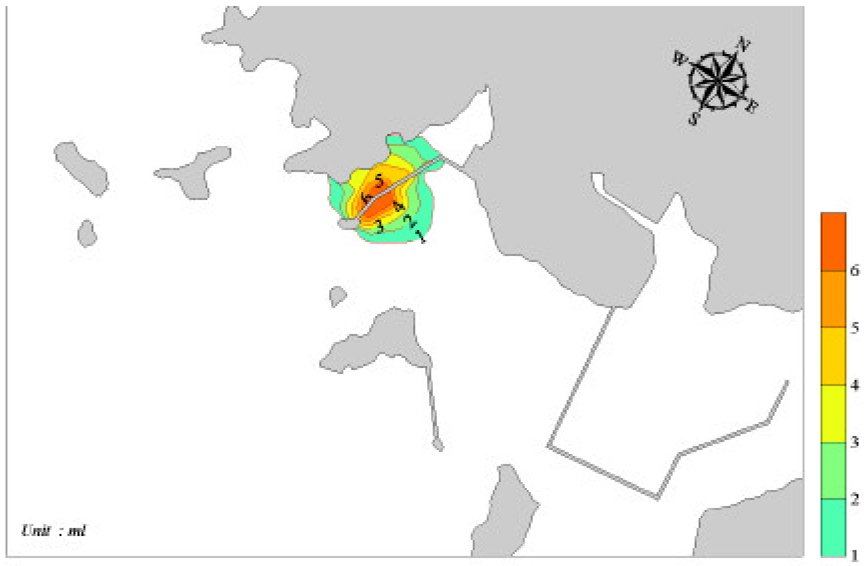


Fig.5.50 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 2 with silt protector

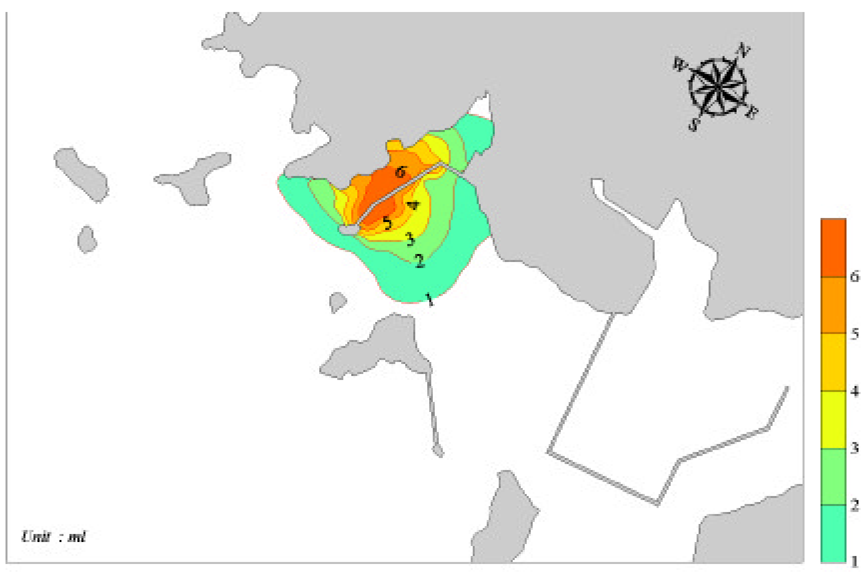


Fig.5.51 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 2 with silt protector

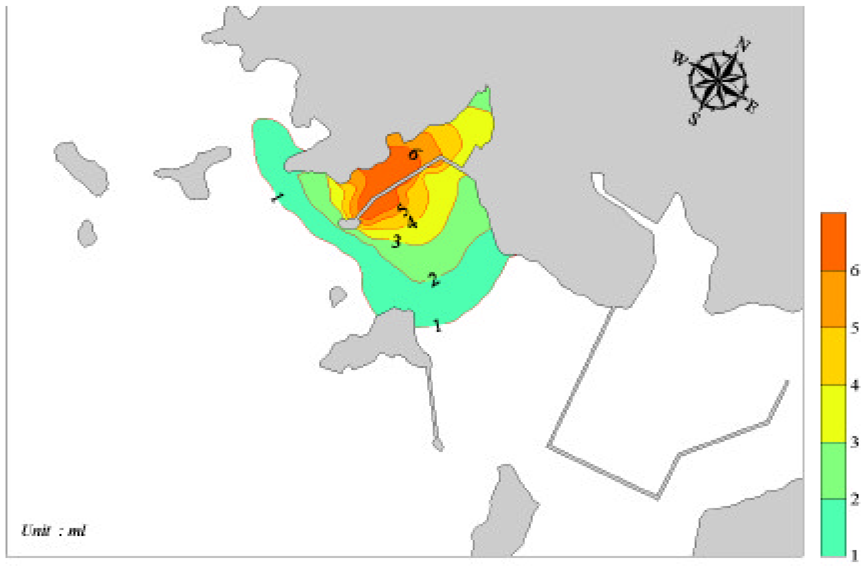


Fig.5.52 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 2 with silt protector

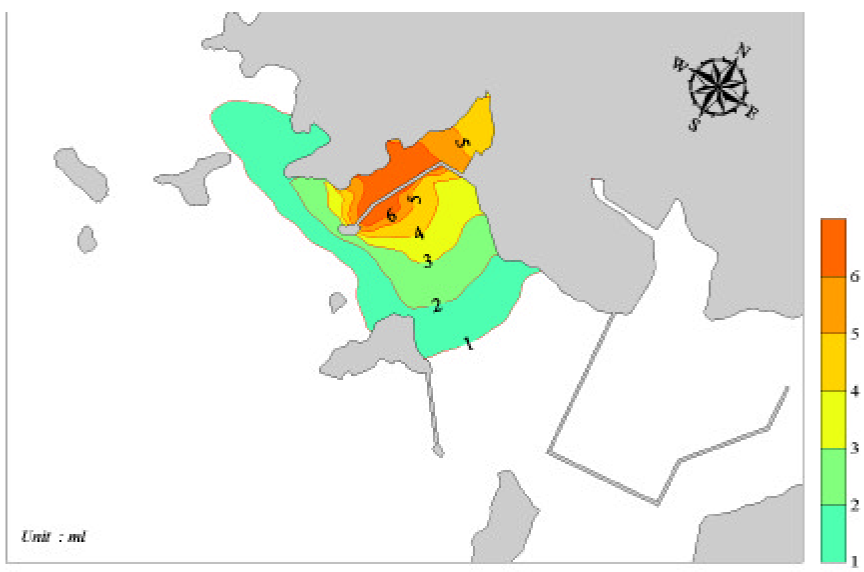


Fig.5.53 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 2 with silt protector

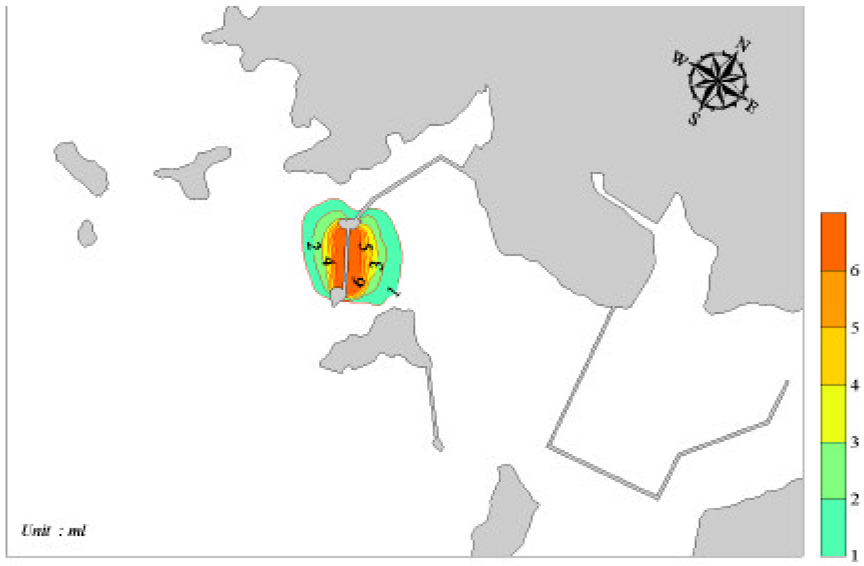


Fig.5.54 Distribution of SS in the harbor after 1 cycle of the tidal period for Case 3 with silt protector

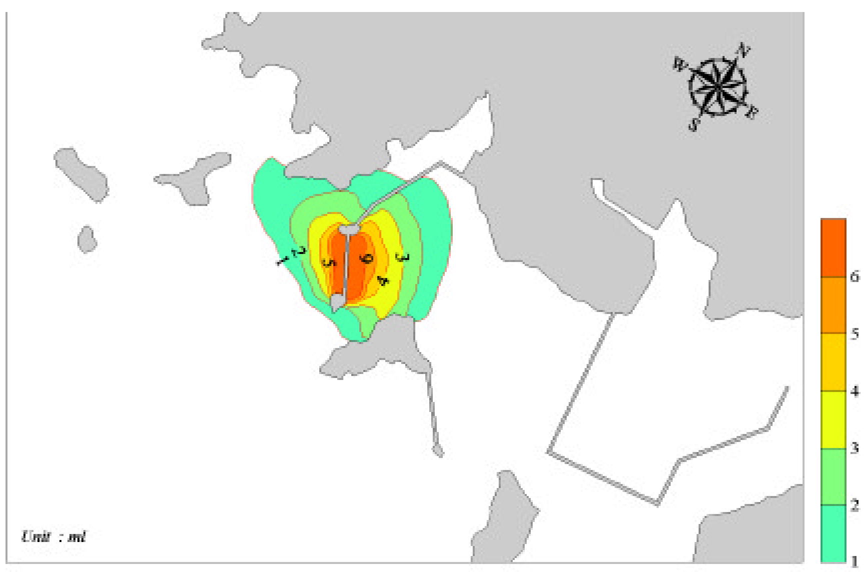


Fig.5.55 Distribution of SS in the harbor after 5 cycle of the tidal period for Case 3 with silt protector

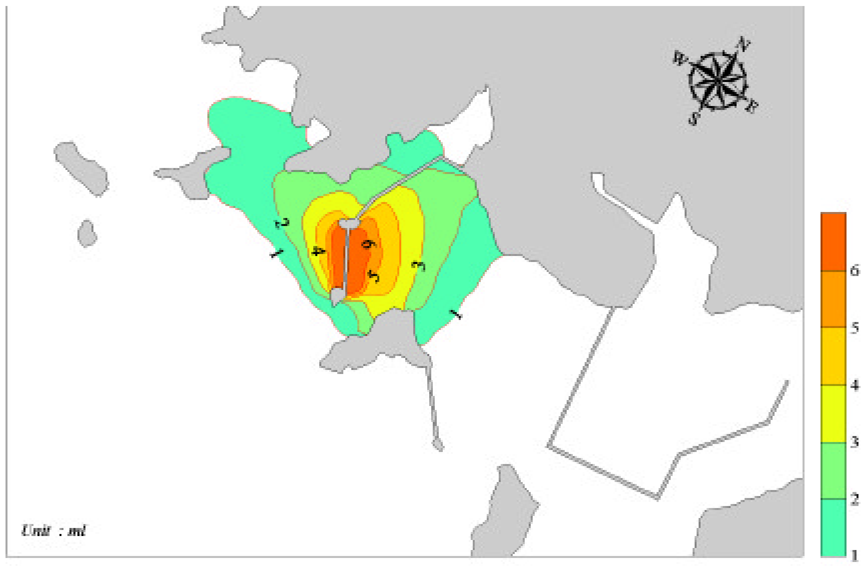


Fig.5.56 Distribution of SS in the harbor after 10 cycle of the tidal period for Case 3 with silt protector

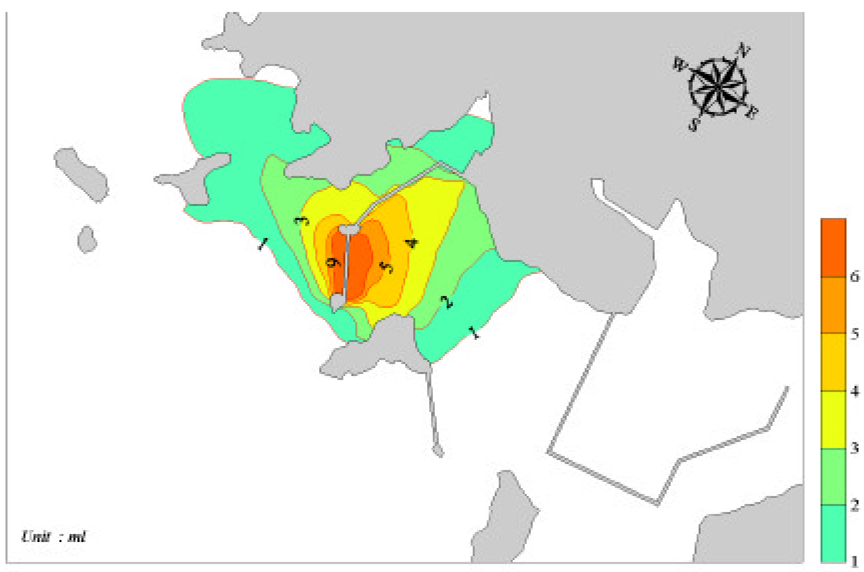


Fig.5.57 Distribution of SS in the harbor after 15 cycle of the tidal period for Case 3 with silt protector

이상의 부유물확산에 대한 수치실험 결과를 정리하면 다음과 같다. Fig.5.58 Fig.5.66은 각 Case별로 1조석주기 동안에 농도의 변화량을 나타낸 것으로 초기의 5조석주기 이하에서는 0.3mg/l 이상의 영역이 광범위하게 펼쳐져 있으나 10조석주기를 넘으면서부터는 0.1mg/l 이하의 정도로 농도에 변화를 가져오는 것으로 분석되었다. Fig.5.67 Fig.5.75의 경우와 같이 오탁방지막을 설치한 경우에는 그 변화량이 극히 미미한 것으로 나타났다. 수치실험의 결과를 위치점 P4, P5, P6, P7에서 비교한 것이 Fig.5.76 Fig.5.79이다. 선택된 위치점은 본 연구와 관계가 깊은 지점으로 각 Case별 주어진 조석주기 후에 오탁방지막의 설치 전후의 농도변화를 그래프로 재정리하였다. 예상된 바와 같이 방오막의 효과는 그대로 반영이 되었으며, 각 위치점에서 농도는 10조석주기 이후부터 거의 변동이 없는 안정한 상태로 수렴하게 된다. 단, 위치점 P7에서는 공사지점과는 원거리에 있으므로 작업이 시작한지 수일이 지나야 비로소 오탁물질의 확산의 영향권에 들어오고 또한 그 영향도 거의 무시할 수 있는 정도에 불과함을 나타내고 있다. 한편, Fig.5.80 Fig.5.83은 각 위치점에서 각 Case별 주어진 조석주기에서 1조석주기 동안에 오탁방지막의 설치 전후의 농도변화량을 비교한 것이다. 이 경우에는 위치점 P4, P5, P6에서 농도변화량이 급격히 감소하며 15조석주기에 이르면 감소추세가 둔화되어 거의 일정한 수준에 이르게 된다. 위치점 P7의 경우에는 거의 변화가 없으며 매우 완만한 상승세를 나타내는 것에 불과하다.

Fig.5.84 Fig.5.95은 Fig.5.3의 비교지점 중에서 동서방향의 단면 AB와 남북방향의 단면 CD에서의 오염물의 분포 및 변화량을 조석주기에 따라 비교한 것이다. 또한, Table 5.2은 각 조석주기별, 단면위치별, Case별 SS농도의 분포 및 5조석주기 동안에 농도의 차이를 나타낸 것으로 전반적인 변화경향은 농도가 증가하다가 거의 일정수준에 이르면 더 이상 오염의 증가가 일어날 수 없다는 것을 나타낸다.

아울러, Fig.5.96 Fig.5.107도 각 Case별 주어진 조석주기에서 1조석주기 동안에 동서방향의 단면 AB와 남북방향의 단면 CD에서의 농도변화량을 오탁방지막의 유무에 따라 변화하는 정도를 그래프로 나타낸 것이다. 오탁방지막의 효과를 그대로 나타내면서 조석주기의 경과에 따라 농도의 변화량도 점차 둔화됨을 나타내 보이고 있다. 또한 그래프에서 공간적인 최대 농도변화를 나타내는 지점도 유동패턴에 따라 호안 공사구간에서 점차 멀어지고 있음을 알 수 있다. Table 5.3은 각 조석주기별, 단면위치별, Case별 SS농도의 분포 및 1조석주기 동안에 농도의 차이를 나타낸 것으로 전반적인 변화경향은 농도가 증가하다가 거의 일정수준에 이르면 더 이상 오염의 증가가 일어날 수 없다는 것을 나타낸다. 또한, 개방수역인 A지점과 C지점과는 달리 폐쇄 또는 반폐쇄 수역인 B지점과 D지점에서의 농도변화는 오히려 증가하는 방향으로 나타나고 있음에 주의하여야 한다.

이상의 실험에서, 오탁방지막 등의 저감대책을 수립할 경우 부유사 발생영역을 훨씬 넓은 범위까지 감소시킬 수 있을 것으로 판단되며, 특히 장래에 준설시나 투기장에서 매립시와 같이 부유토사가 대량으로 발생할 것으로 예상되는 경우의 저감효과는 이보다 훨씬 탁월할 것으로 사료된다.

Table 5.2 Variation of SS for given tidal cycles at the selected stations

Tidal cycle			Distribution of SS				Increment of SS			
			A	B	C	D	A	B	C	D
Without silt protector	Case 1	1	0.001	0	0	3.465	0.001	0	0	3.465
		5	0.251	0.178	0.001	11.80	0.25	1.178	0.001	8.335
		10	0.725	0.845	0.005	14.41	0.474	0.667	0.004	2.61
		15	1.002	1.502	0.014	14.83	0.277	0.657	0.009	0.42
	Case 2	1	0.019	0	0	0.008	0.019	0	0	0.008
		5	0.786	0.175	0.002	2.400	0.767	0.175	0.002	2.392
		10	1.660	0.839	0.019	6.446	0.874	0.664	0.017	4.046
		15	2.114	1.546	0.028	9.012	0.454	0.707	0.261	2.566
	Case 3	1	0.005	0	0	0	0.005	0	0	0
		5	0.977	0.139	0.035	0.105	0.972	0.139	0.035	0.105
		10	2.245	0.643	0.097	0.824	1.268	0.504	0.935	0.719
		15	2.961	1.260	0.114	2.019	0.716	0.617	0.017	1.195
With silt protector	Case 1	1	0	0	0	1.586	0	0	0	1.586
		5	0.121	0.075	0	5.960	0.121	0.075	0.0007	4.374
		10	0.339	0.421	0.004	7.210	0.218	0.346	0.004	1.25
		15	0.505	0.753	0.005	7.415	0.166	0.332	0.001	0.205
	Case 2	1	0.017	0	0	0.002	0.017	0	0	0.002
		5	0.401	0.087	0.001	1.039	0.384	0.087	0.001	1.037
		10	0.816	0.398	0.008	3.080	0.415	0.311	0.007	2.041
		15	1.044	0.765	0.014	4.546	0.228	0.367	0.006	1.466
	Case 3	1	0.003	0	0	0	0.003	0	0	0
		5	0.491	0.072	0.020	0.050	0.488	0.072	0.02	0.05
		10	1.126	0.333	0.051	0.423	0.635	0.261	0.031	0.373
		15	1.469	0.620	0.064	1.012	0.343	0.287	0.013	0.589

Table 5.3 Variation of SS for 1 tidal cycle at the selected stations

Tidal cycle		Without silt protector				With silt protector			
		Distribution of SS				Distribution of SS			
		A	B	C	D	A	B	C	D
Case 1	1	0.001	0	0	3.465	0	0	0	1.586
	4 5	0.091	0.090	0	1.374	0.046	0.042	0	0.635
	9 10	0.082	0.144	0.002	0.237	0.040	0.075	0.0007	0.114
	14 15	0.054	0.128	0.001	0.048	0.027	0.063	0.0006	0.023
Case 2	1	0.019	0	0	0.008	0.017	0	0	0.002
	4 5	0.231	0.088	0.002	0.819	0.115	0.042	0.001	0.410
	9 10	0.131	0.143	0.003	0.722	0.066	0.070	0.002	0.349
	14 15	0.073	0.130	0.002	0.464	0.036	0.064	0.001	0.239
Case 3	1	0.005	0	0	0	0.003	0	0	0
	4 5	0.316	0.079	0.018	0.053	0.160	0.037	0.007	0.031
	9 10	0.206	0.120	0.006	0.210	0.103	0.061	0.004	0.104
	14 15	0.119	0.114	0.003	0.248	0.059	0.059	0.002	0.124

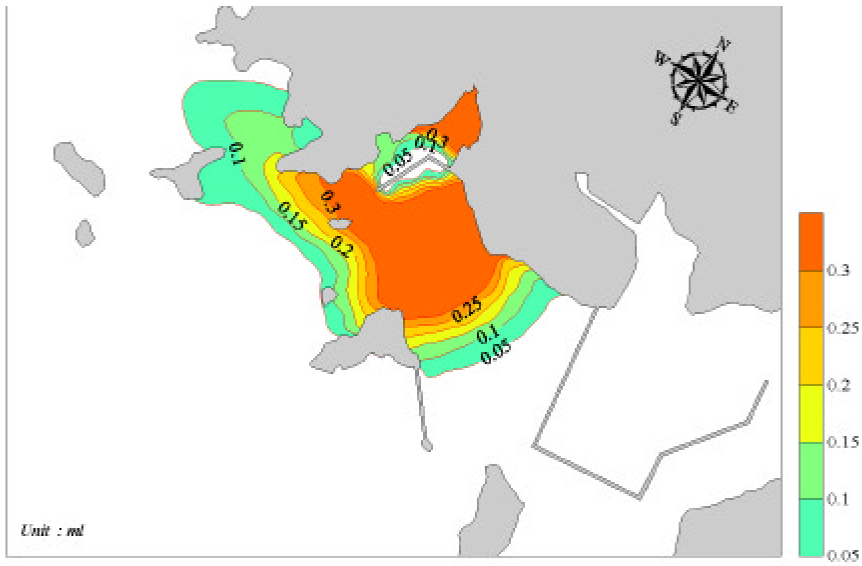


Fig.5.58 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period without silt protector(Case 1)

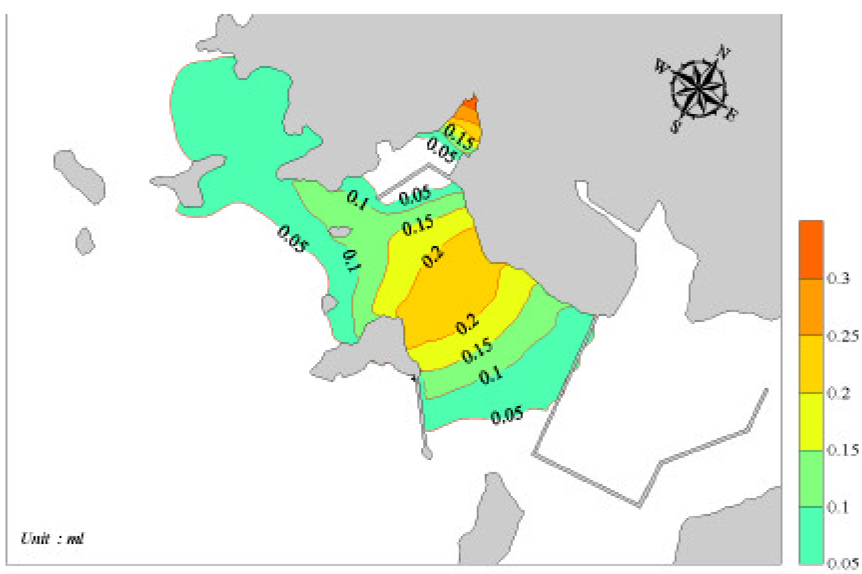


Fig.5.59 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period without silt protector(Case 1)

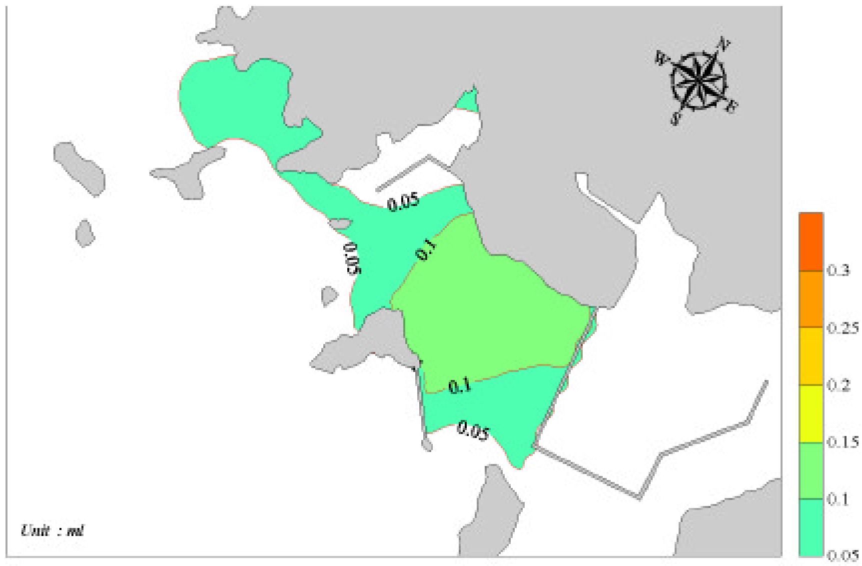


Fig.5.60 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period without silt protector(Case 1)

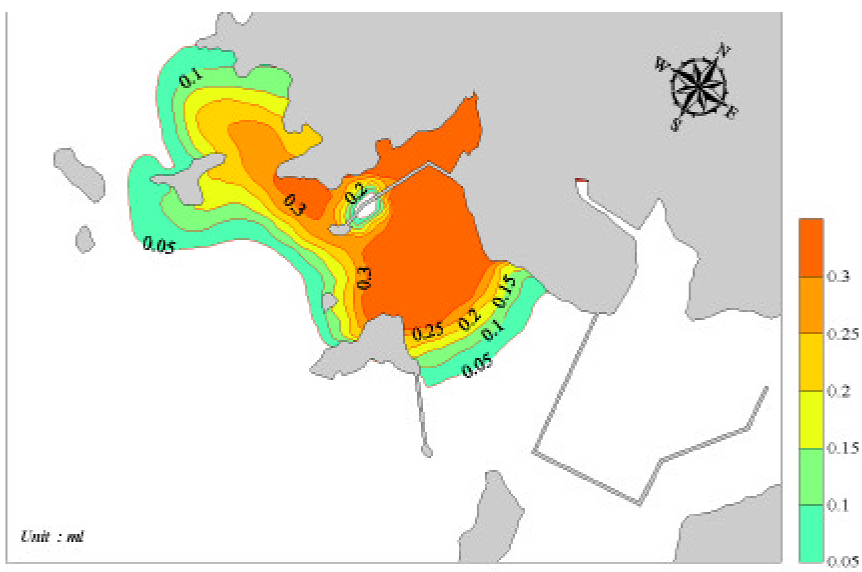


Fig.5.61 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period without silt protector(Case 2)

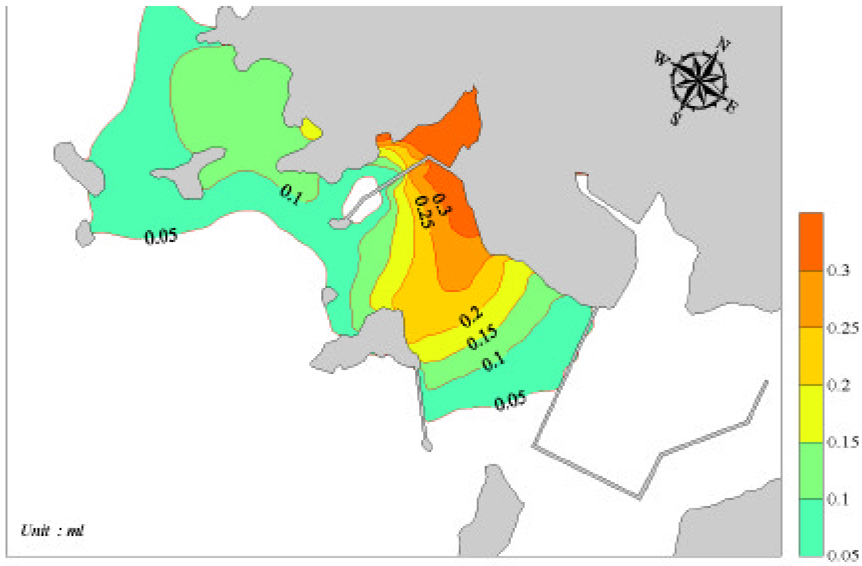


Fig.5.62 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period without silt protector(Case 2)

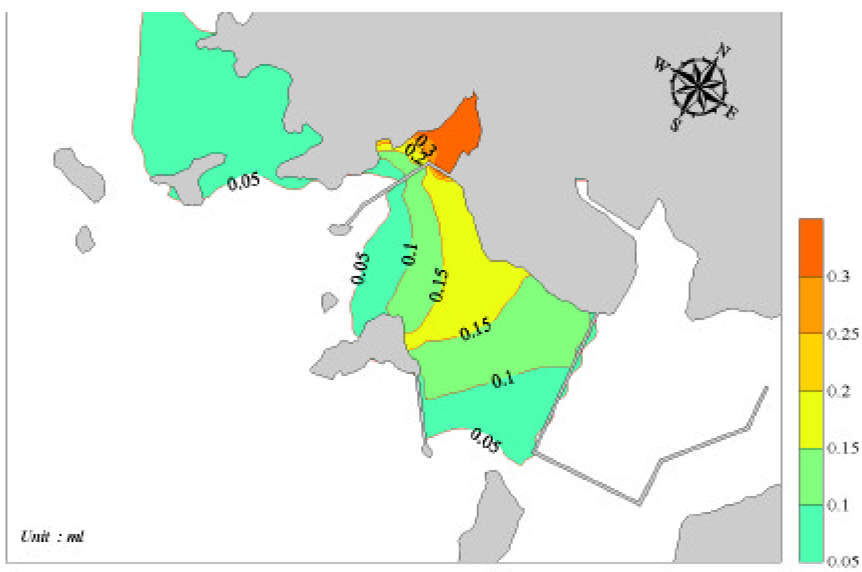


Fig.5.63 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period without silt protector(Case 2)

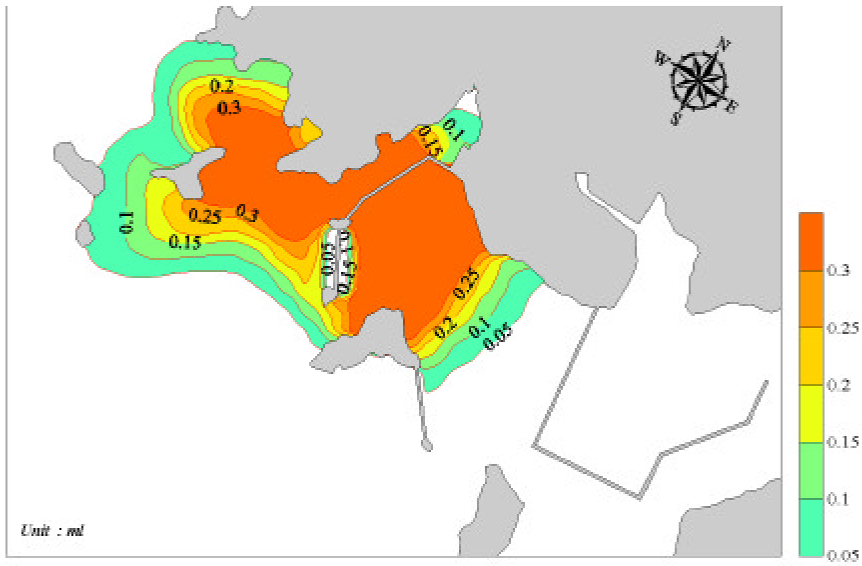


Fig.5.64 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period without silt protector(Case 3)

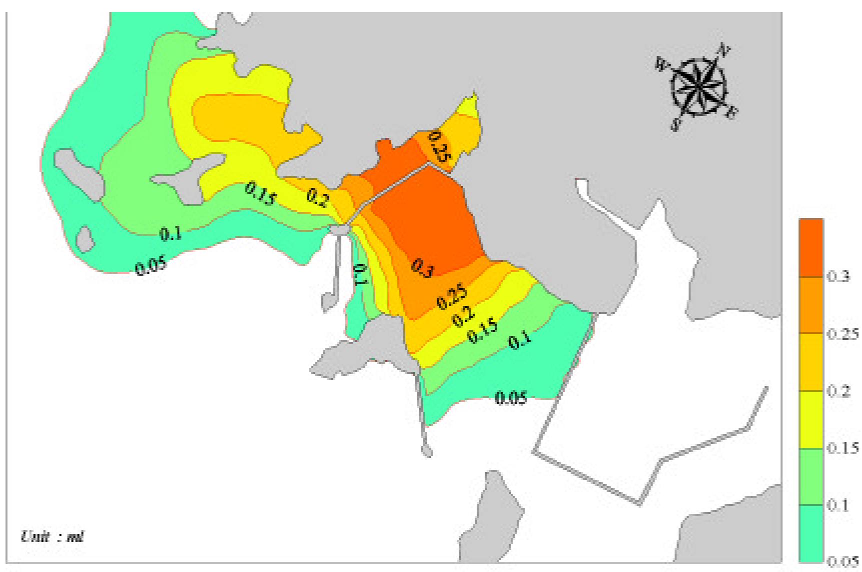


Fig.5.65 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period without silt protector(Case 3)

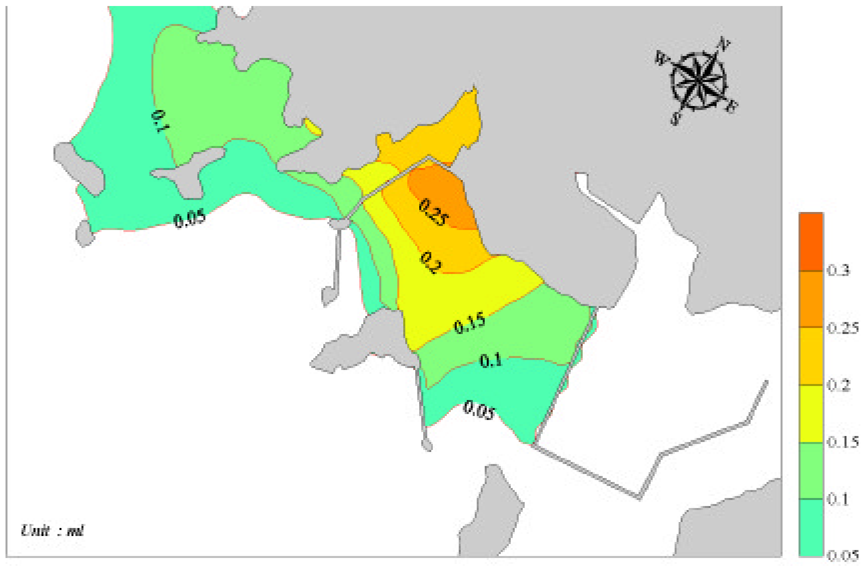


Fig.5.66 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period without silt protector(Case 3)

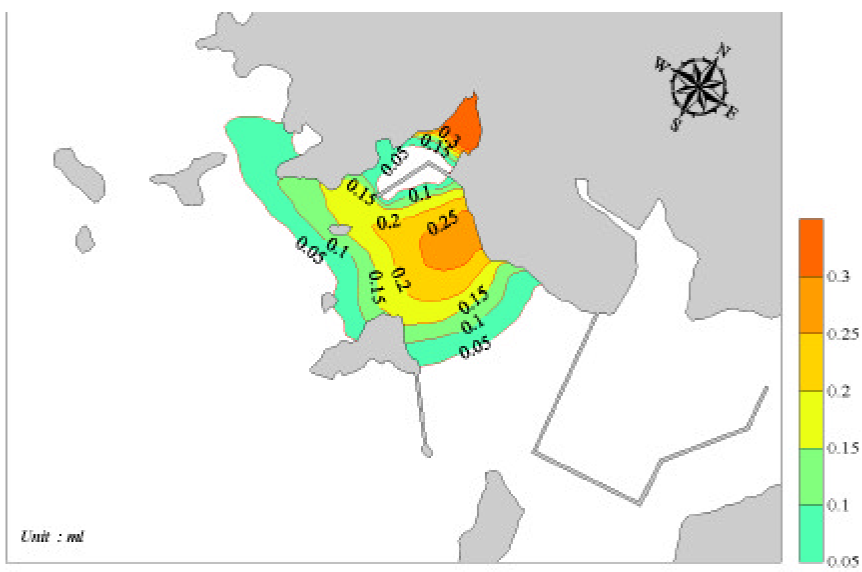


Fig.5.67 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period with silt protector(Case 1)

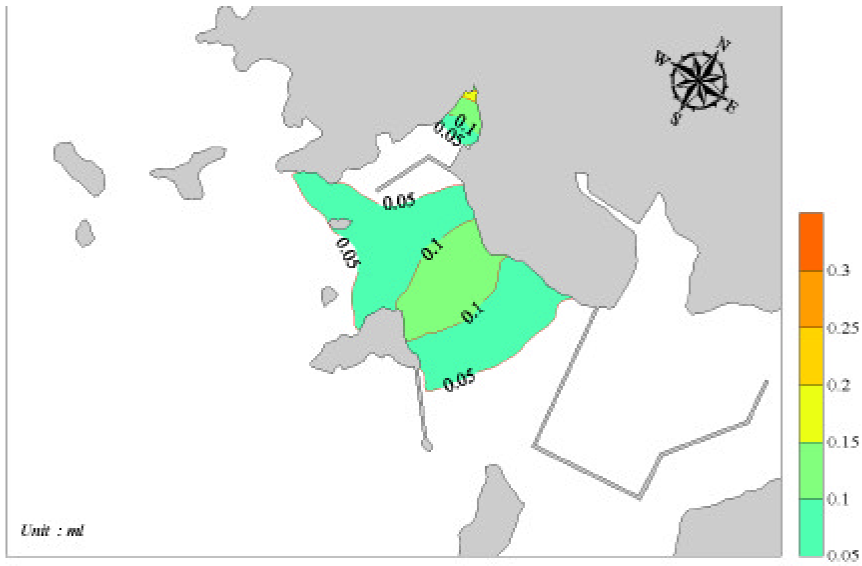


Fig.5.68 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period with silt protector(Case 1)

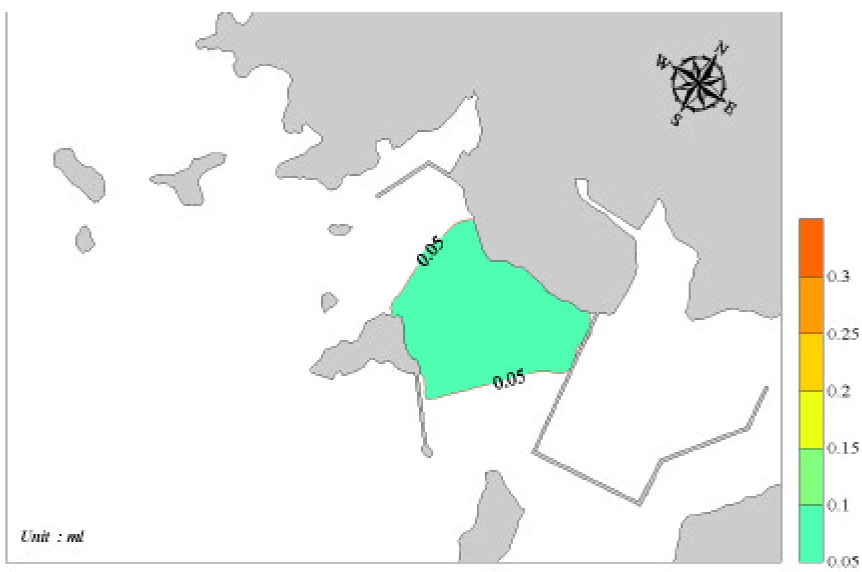


Fig.5.69 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period with silt protector(Case 1)

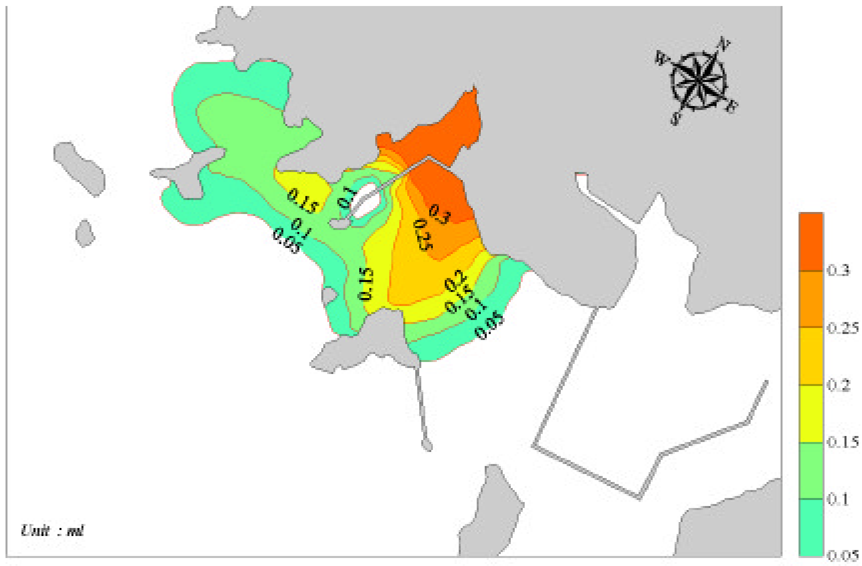


Fig.5.70 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period with silt protector(Case 2)

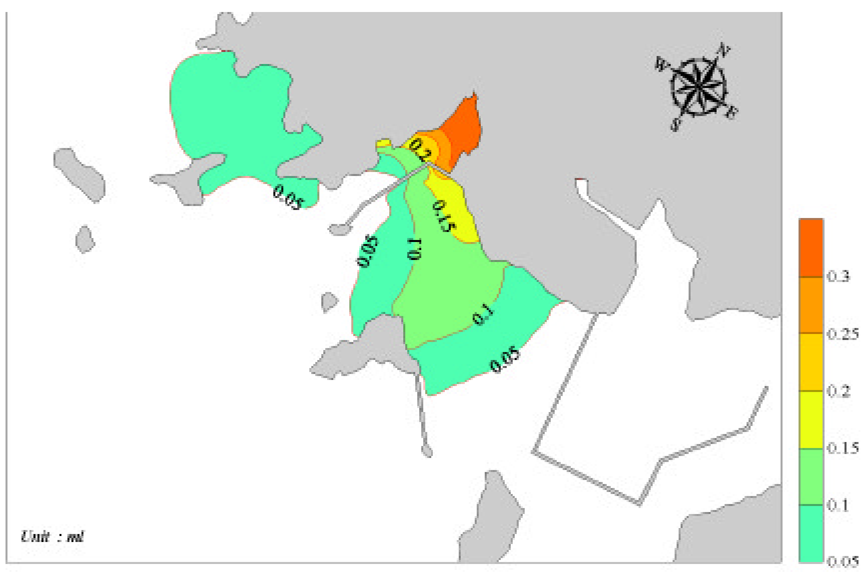


Fig.5.71 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period with silt protector(Case 2)

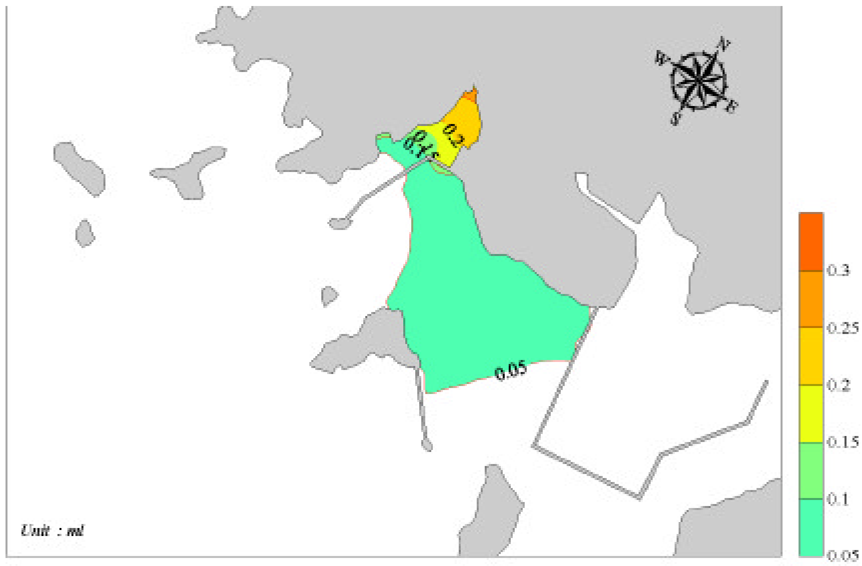


Fig.5.72 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period with silt protector(Case 2)

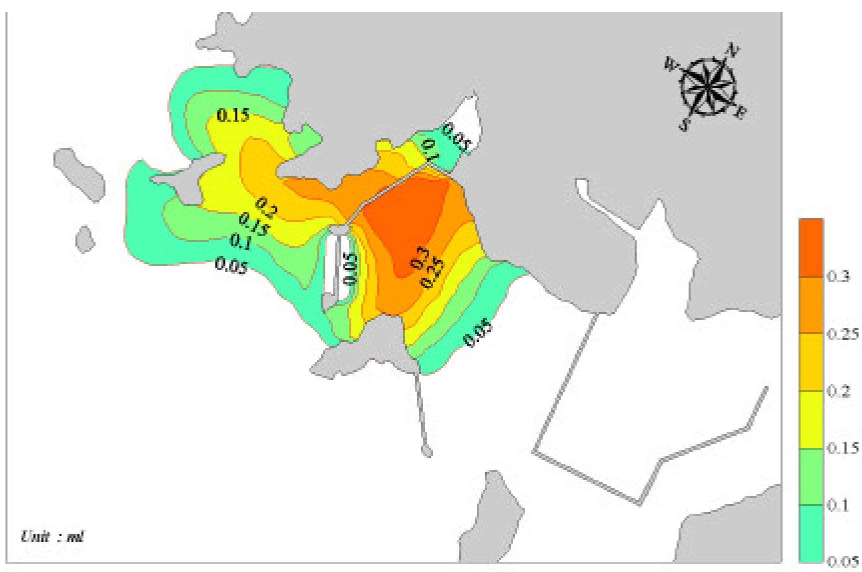


Fig.5.73 SS difference between 4 and 5 cycles of tidal period with silt protector(Case 3)

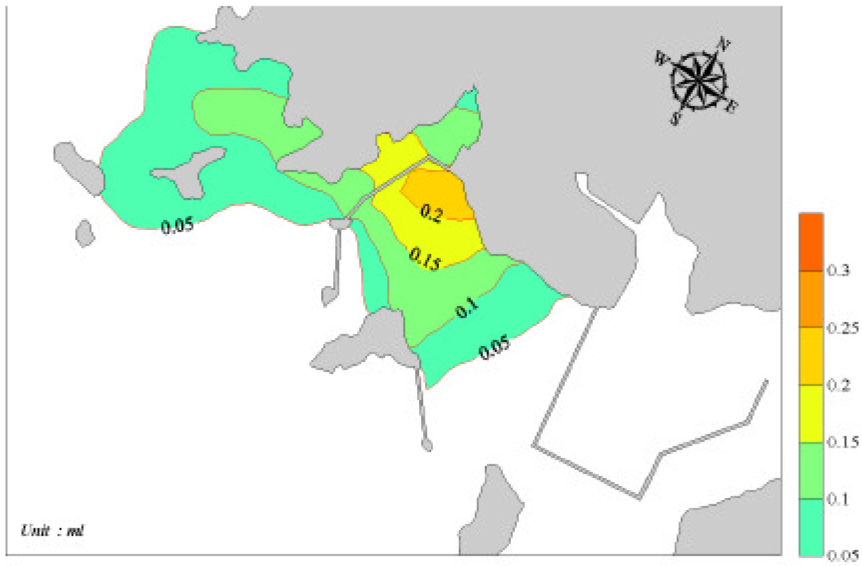


Fig.5.74 SS difference between 9 and 10 cycles of tidal period with silt protector(Case 3)

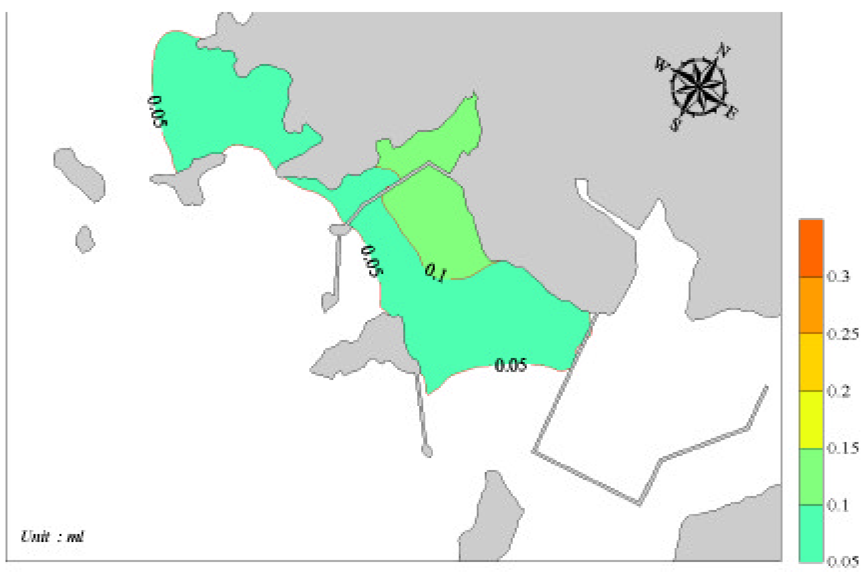


Fig.5.75 SS difference between 14 and 15 cycles of tidal period with silt protector(Case 3)

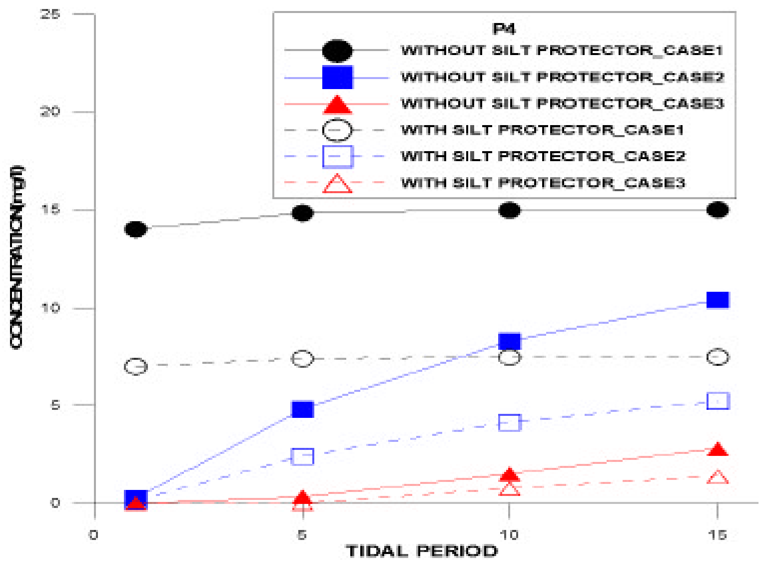


Fig.5.76 Distribution of SS for each tidal period at station P4

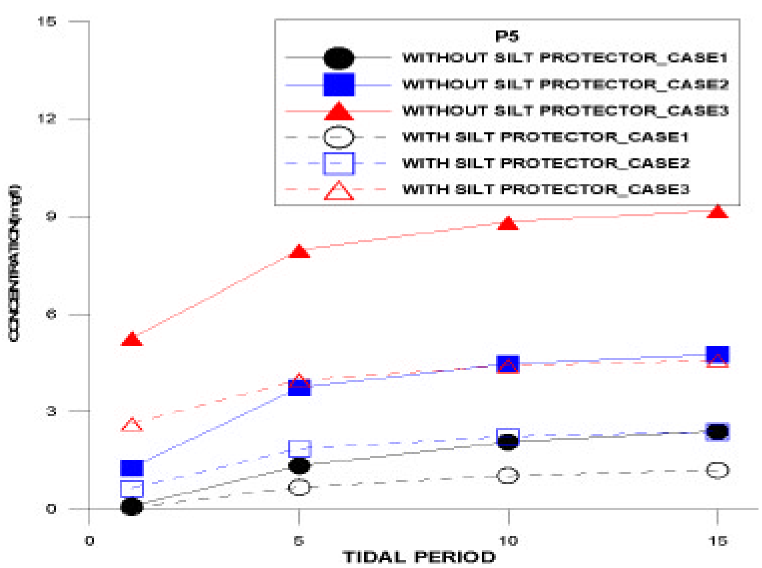


Fig.5.77 Distribution of SS for each tidal period at station P5

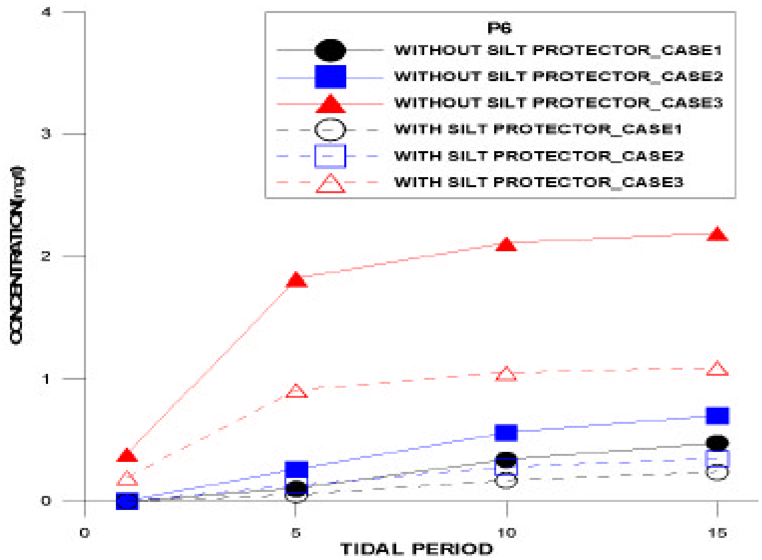


Fig.5.78 Distribution of SS for each tidal period at station P6

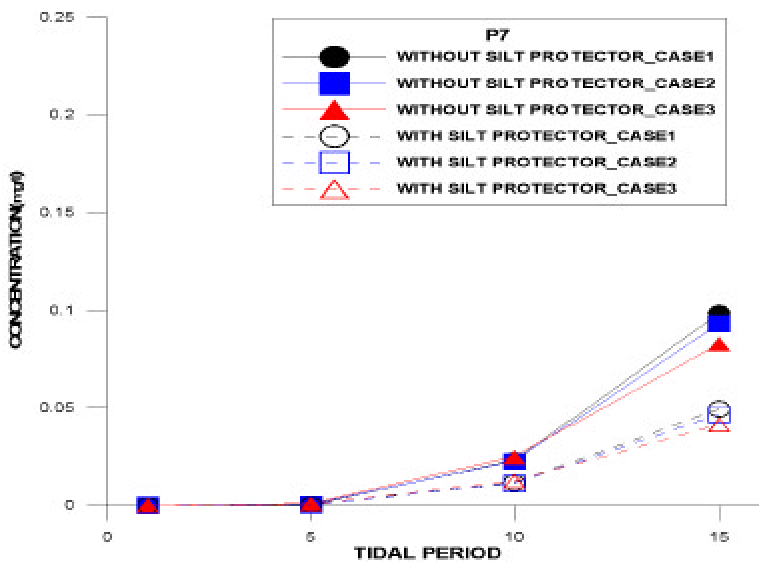


Fig.5.79 Distribution of SS for each tidal period at station P7

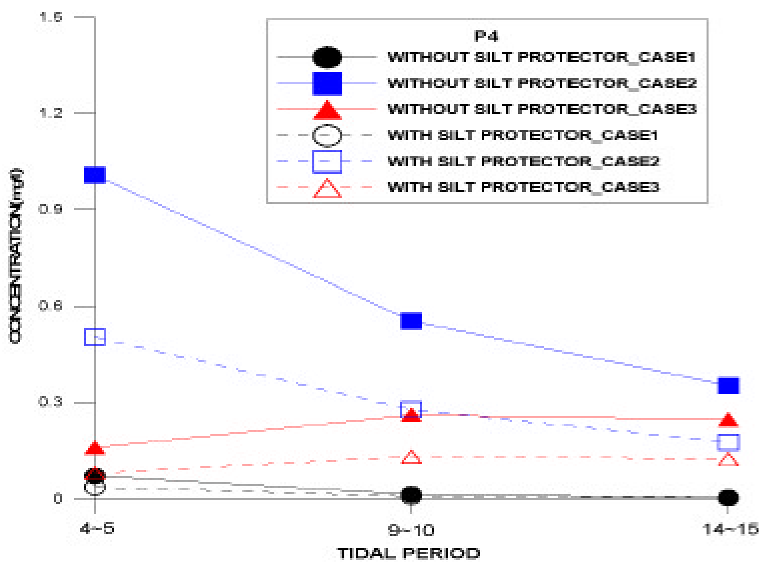


Fig.5.80 Change of concentration for each tidal period at station P4

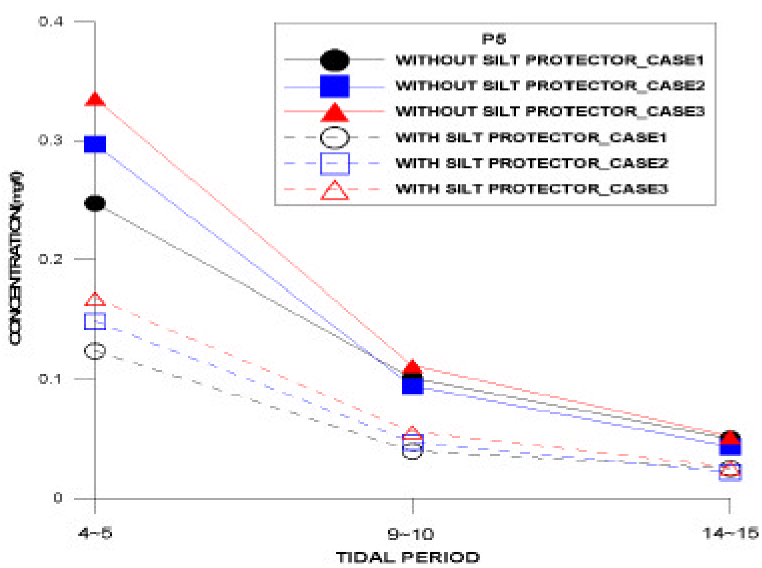


Fig.5.81 Change of concentration for each tidal period at station P5

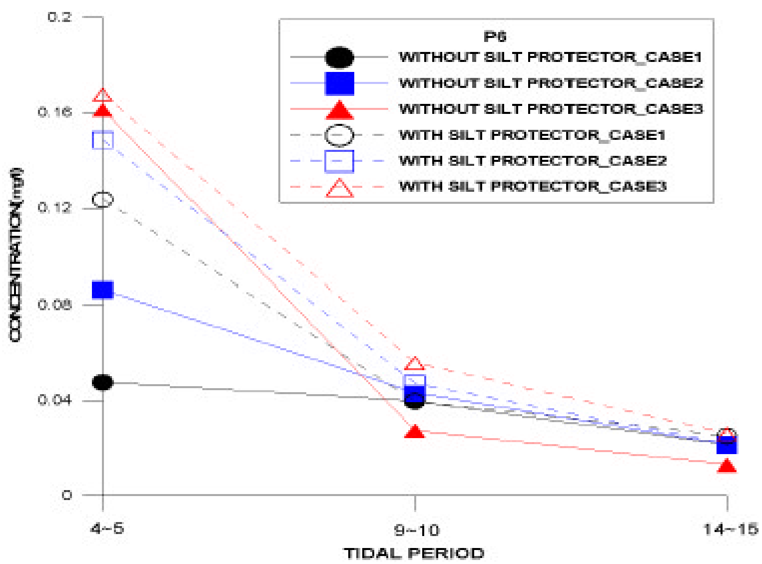


Fig.5.82 Change of concentration for each tidal period at station P6

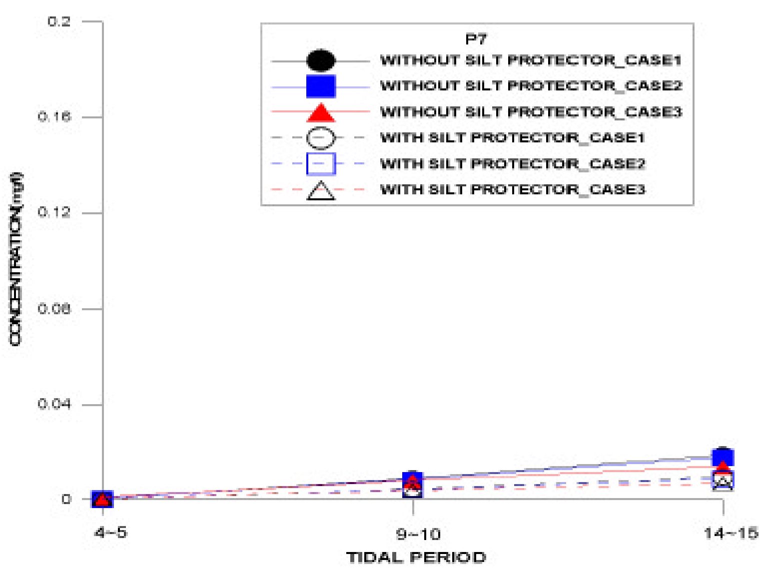


Fig.5.83 Change of concentration for each tidal period at station P7

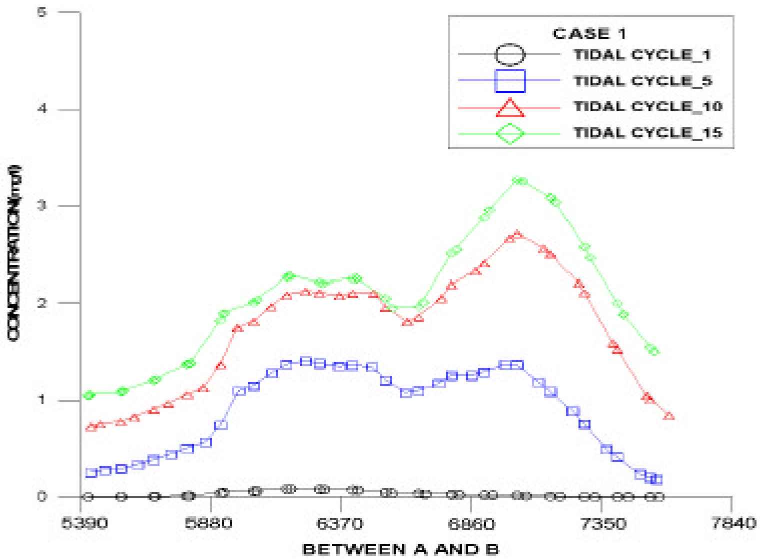


Fig.5.84 Distribution of SS at the cross section A-B without silt protector for Case 1

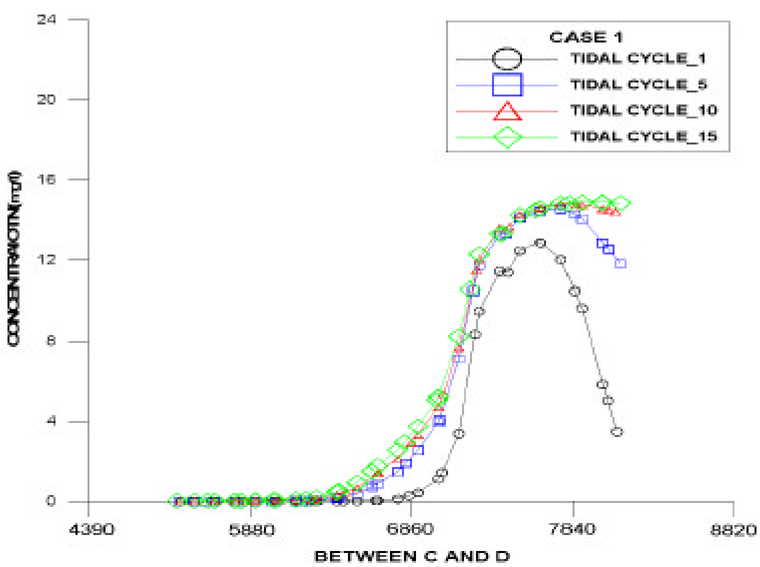


Fig.5.85 Distribution of SS at the cross section C-D without silt protector for Case 1

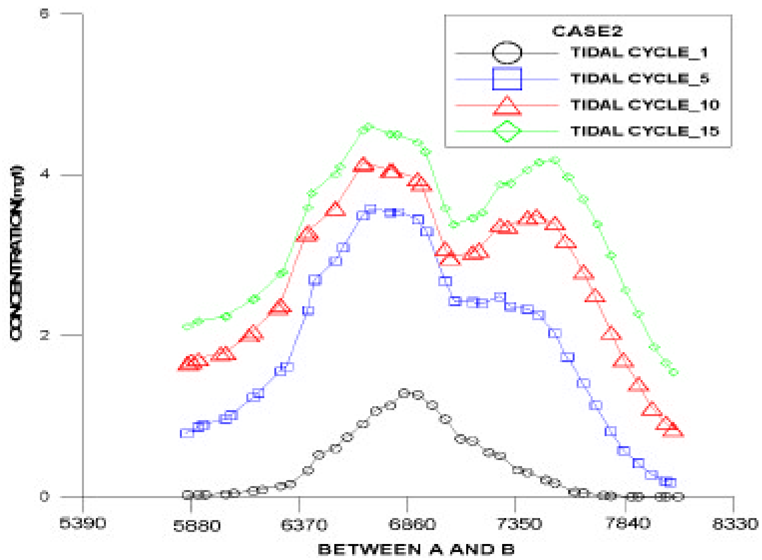


Fig.5.86 Distribution of SS at the cross section A-B without silt protector for Case 2

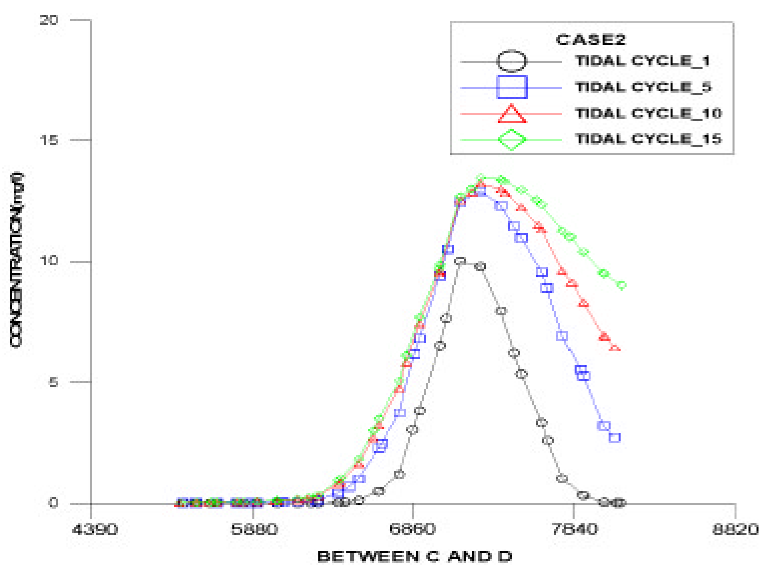


Fig.5.87 Distribution of SS at the cross section C-D without silt protector for Case 2

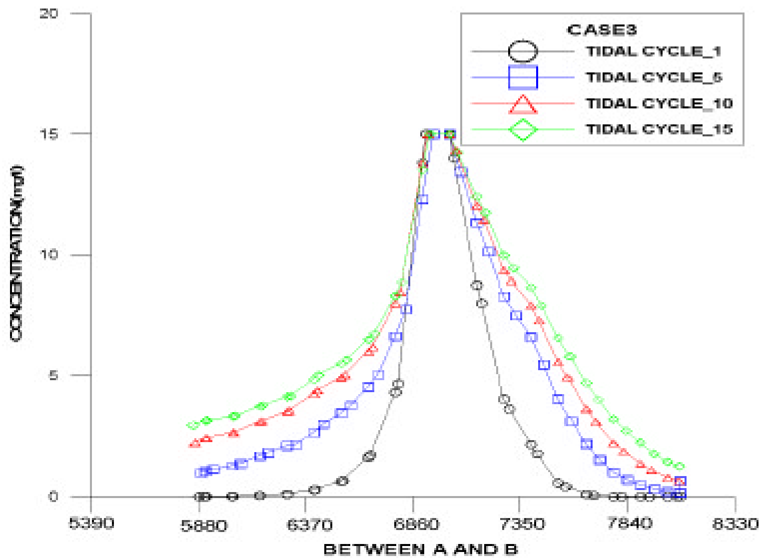


Fig.5.88 Distribution of SS at the cross section A-B without silt protector for Case 3

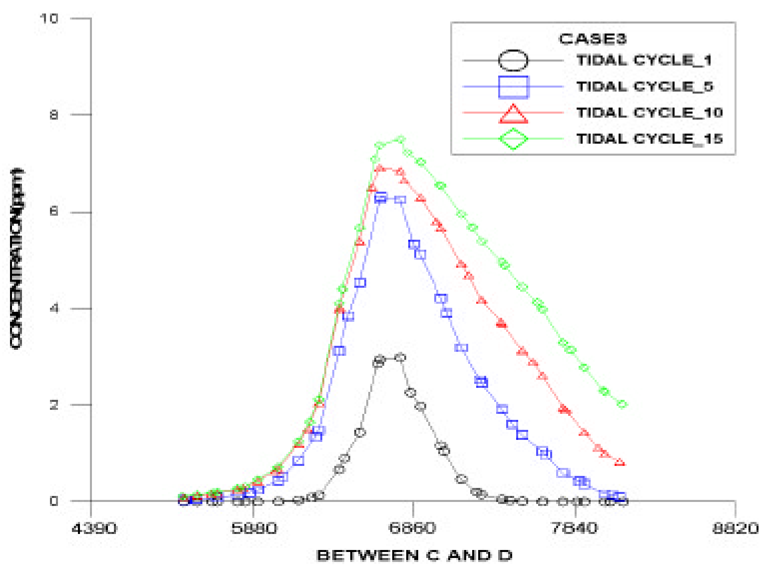


Fig.5.89 Distribution of SS at the cross section C-D without silt protector for Case 3

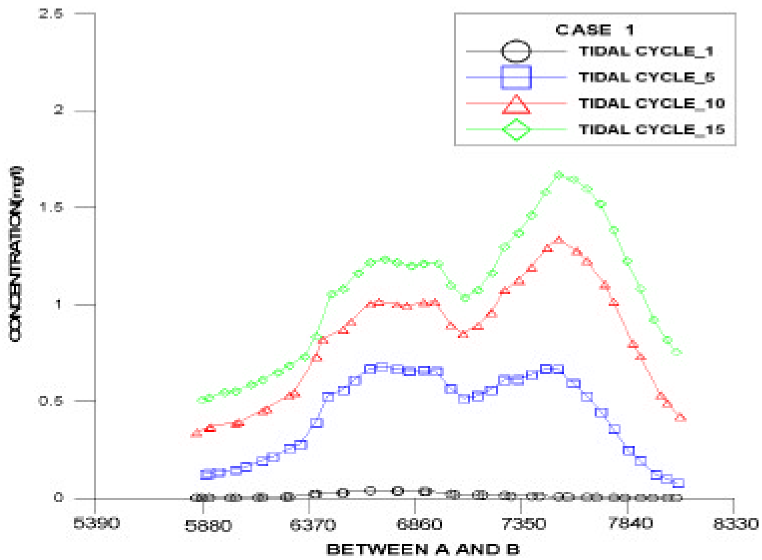


Fig.5.90 Distribution of SS at the cross section A-B with silt protector for Case 1

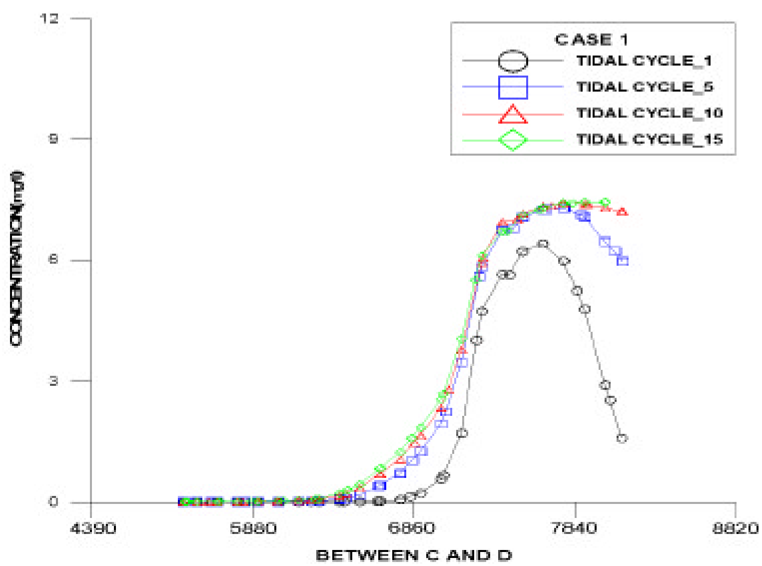


Fig.5.91 Distribution of SS at the cross section C-D with silt protector for Case 1

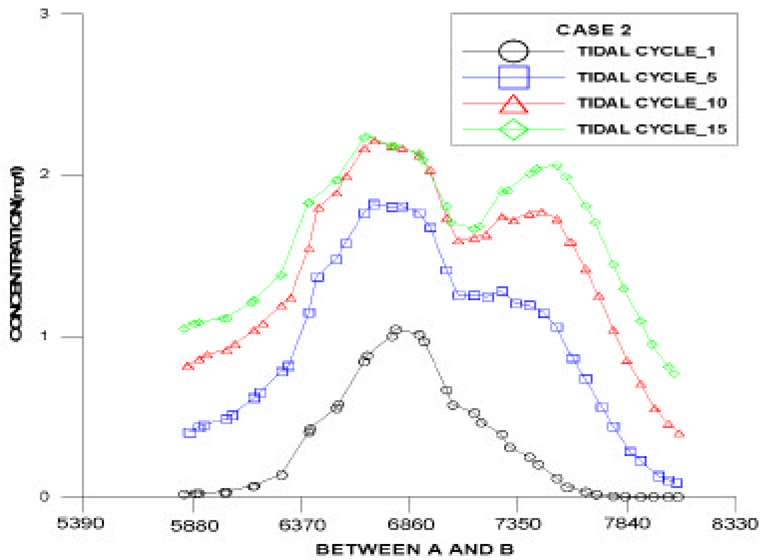


Fig.5.92 Distribution of SS at the cross section A-B with silt protector for Case 2

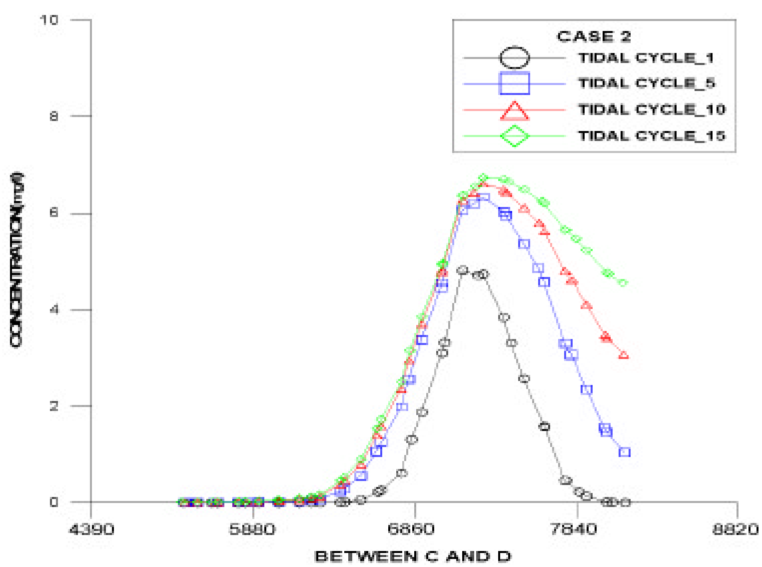


Fig.5.93 Distribution of SS at the cross section C-D with silt protector for Case 2

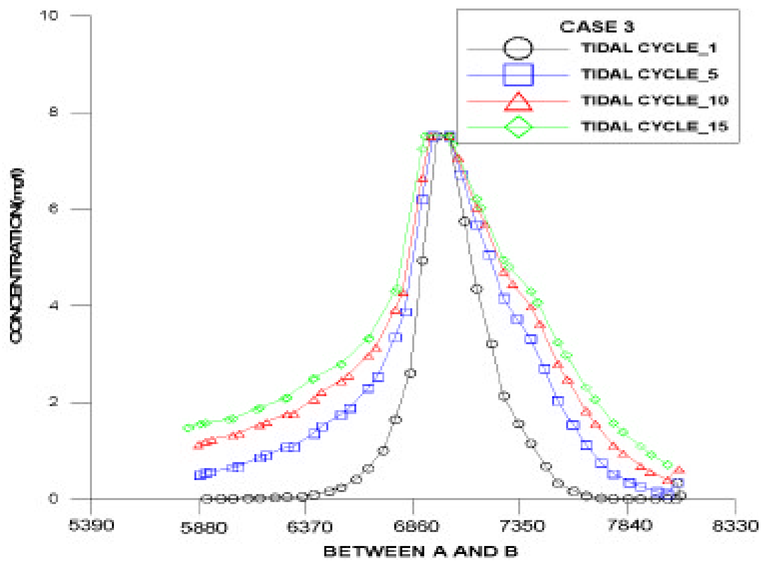


Fig.5.94 Distribution of SS at the cross section A-B with silt protector for Case 3

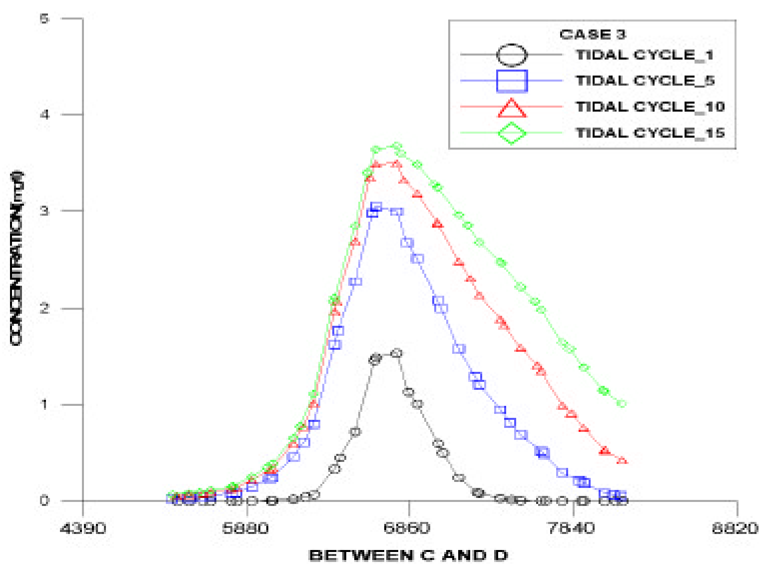


Fig.5.95 Distribution of SS at the cross section C-D with silt protector for Case 3

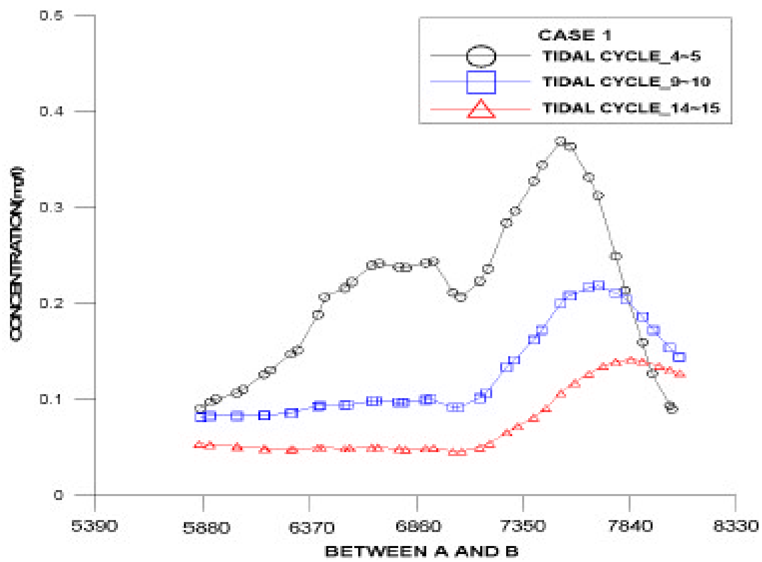


Fig.5.96 SS distribution difference at the cross section A-B without silt protector for Case 1

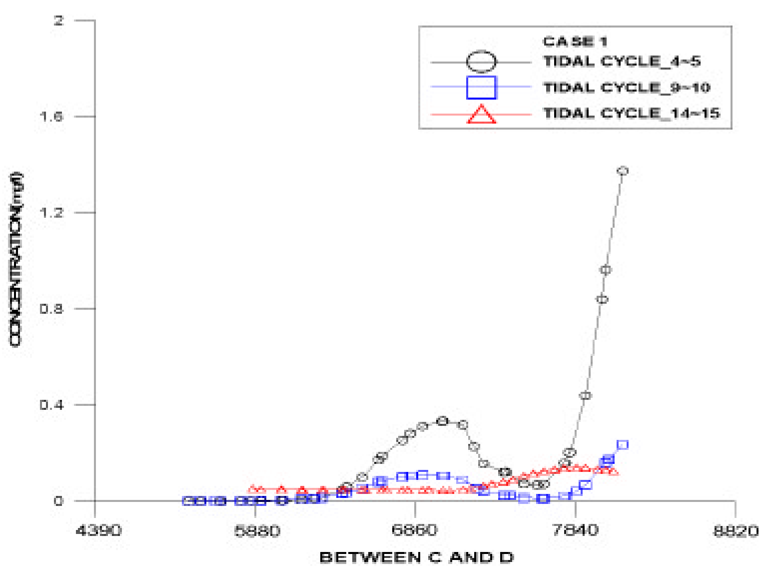


Fig.5.97 SS distribution difference at the cross section C-D without silt protector for Case 1

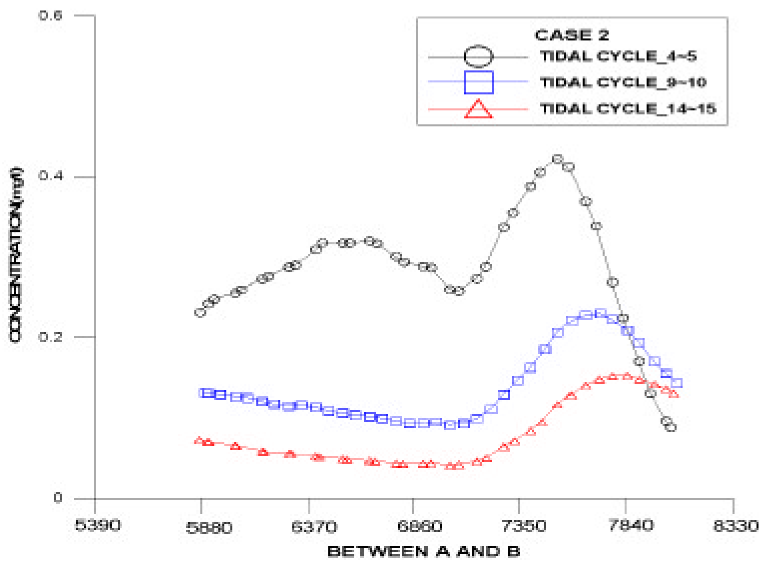


Fig.5.98 SS distribution difference at the cross section A-B without silt protector for Case 2

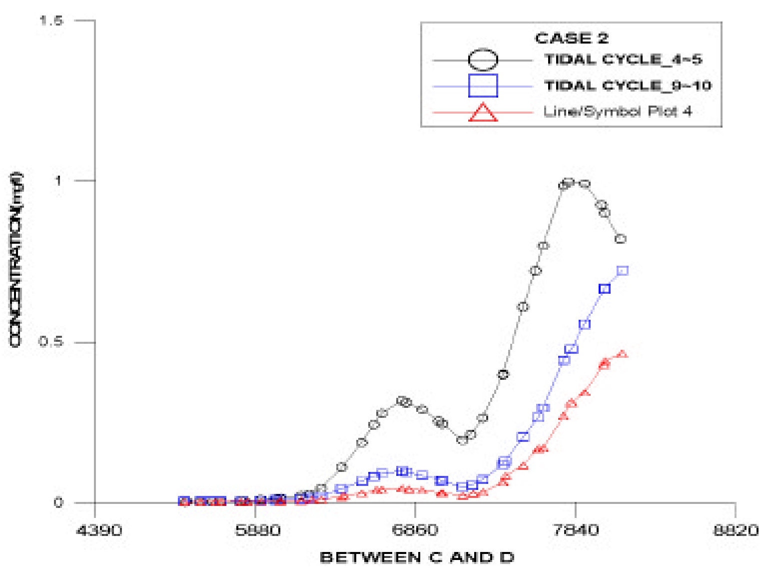


Fig.5.99 SS distribution difference at the cross section C-D without silt protector for Case 2

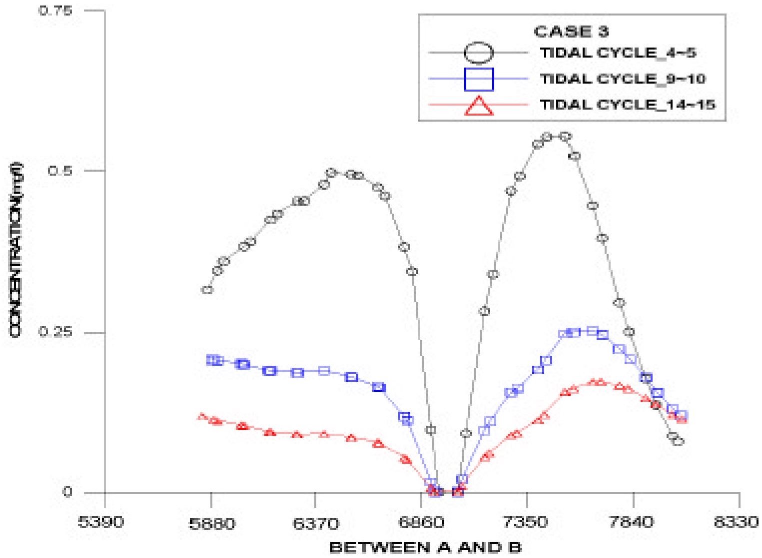


Fig.5.100 SS distribution difference at the cross section A-B without silt protector for Case 3

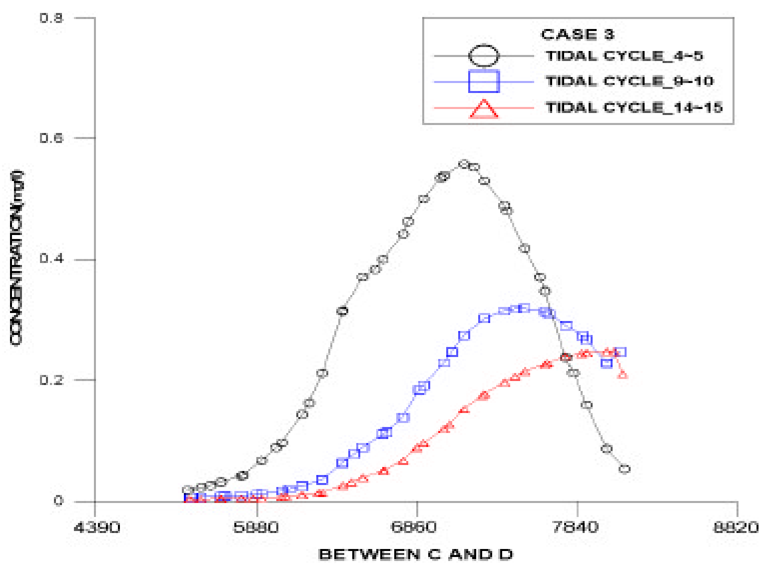


Fig.5.101 SS distribution difference at the cross section C-D without silt protector for Case 3

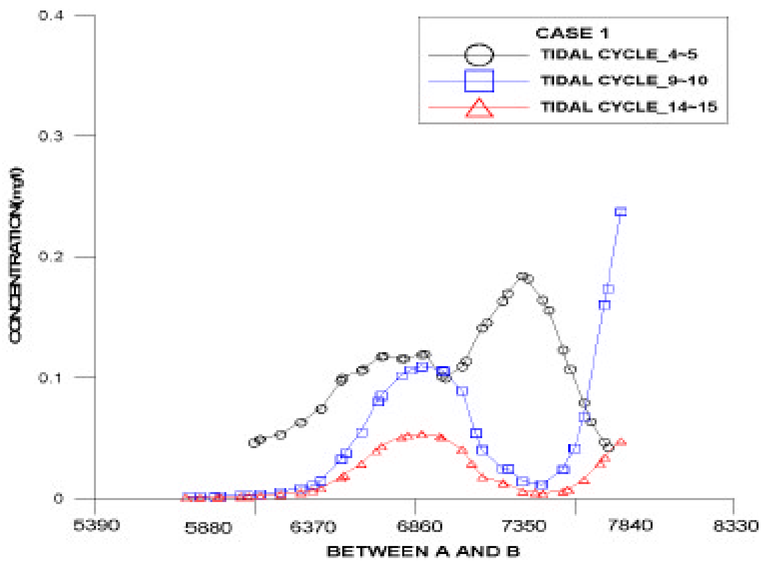


Fig.5.102 SS distribution difference at the cross section A-B with silt protector for Case 1

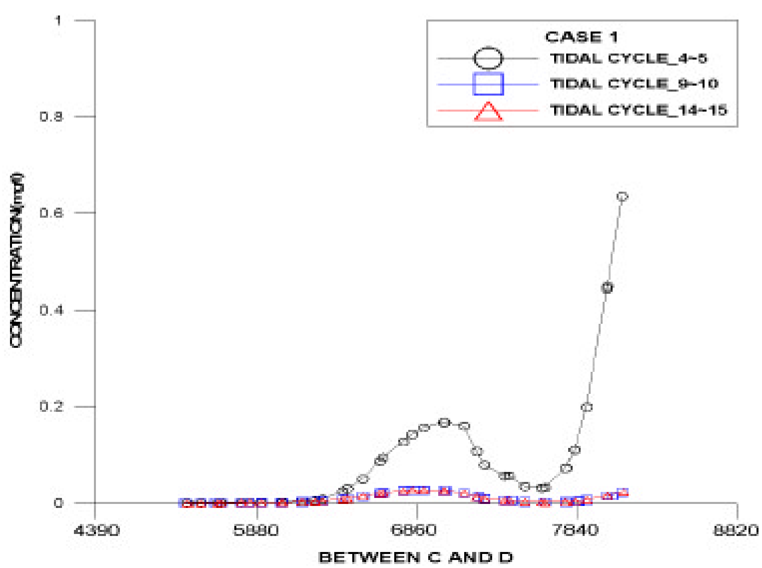


Fig.5.103 SS distribution difference at the cross section C-D with silt protector for Case 1

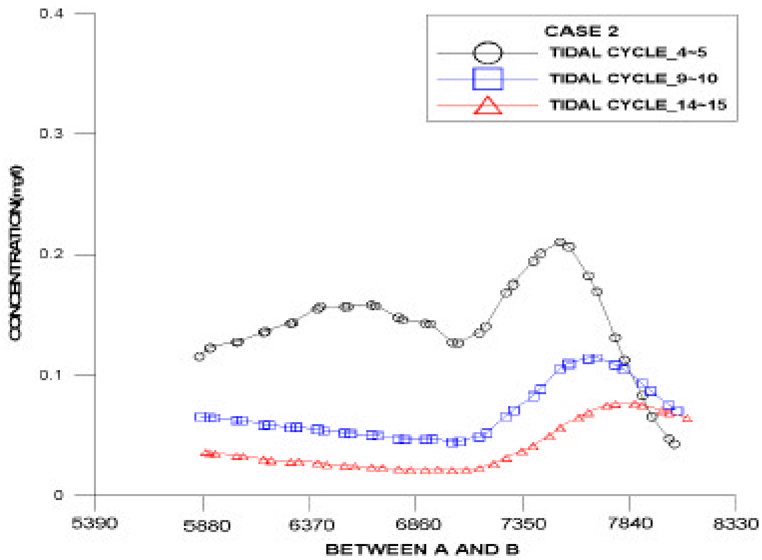


Fig.5.104 SS distribution difference at the cross section A-B with silt protector for Case 2

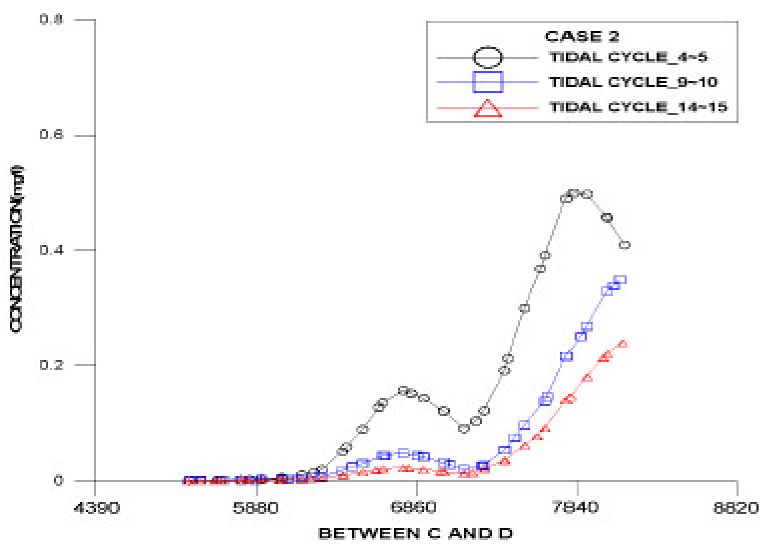


Fig.5.105 SS distribution difference at the cross section A-B with silt protector for Case 2

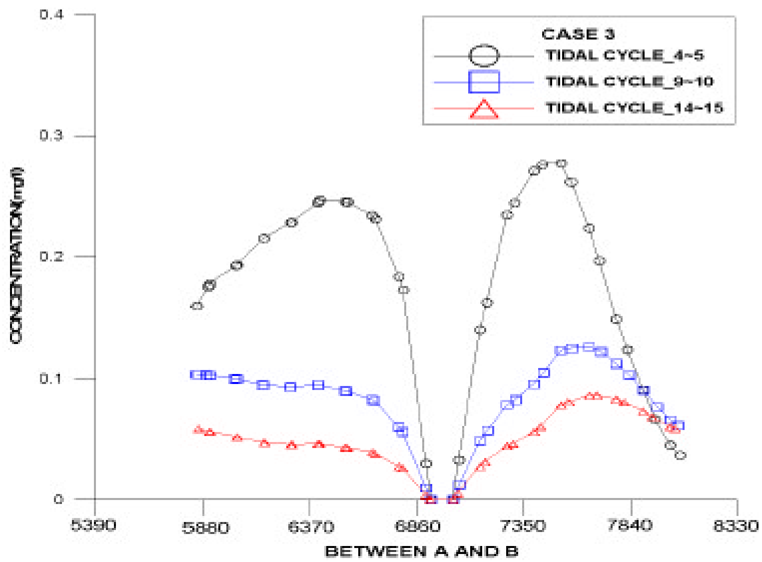


Fig.5.106 SS distribution difference at the cross section A-B with silt protector for Case 3

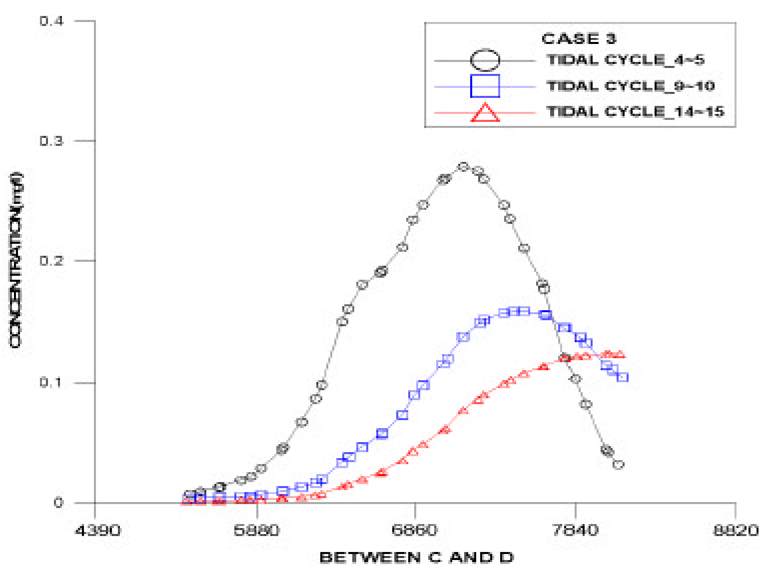


Fig.5.107 SS distribution difference at the cross section C-D with silt protector for Case 3

6. 결론

본 연구에서는 심화되는 대규모 연안역 개발에 따른 지형변형으로 변화하는 해수유동과 오염물의 확산을 유한요소법(FEM)을 적용하여 격자 간격 25m 400m의 가변 요소로 모델을 수립하고 공사단계별 거동 특성을 수치 시뮬레이션하여 비교 및 분석하였다.

모델의 적용 대상지역은 부산 신항만후보지로 모델의 실제 적용에 앞서 해석해가 존재하는 영역에 대하여 실험을 수행하여 검증과정을 걸쳤다. 준설토 투기장(호안포함) 등이 추진되고 있는 가덕도 일원은 반폐쇄 수역이다. 본 연구는 준설토 투기장 조성을 위해 계획한 호안을 건설할 때 단계별 공사중 사석투하로 발생하는 부유물질을 15조석주기 동안의 조석변화에 따라 각 공사단계별, 각 지점별 오탁방지막 설치 전, 후로 분류하여 오염확산을 실험하고 대상해역에서 잔류하는 농도치와 농도증가를 정량적으로 평가하였다. 특히 대상영역은 해안선 이용과 관련한 수역이 산재함으로 공사방법, 과정 등에 따라 부유물질의 영향권을 파악할 필요가 있다.

수치 시뮬레이션을 통한 검토결과 해수유동은 호안이 설치되는 제덕만, 대곶도 주위, 곶도 및 수도사이, 수도와 을미도사이의 지점은 조석에 의한 유동의 영향이 거의 없는 해역이나 신항만계획의 호안을 일괄적으로 적용할 경우 유동에 약간의 변화가 발생하는 것 이외에 특별한 현상을 나타나지 않았다.

그러나 단계적 공사시 유속변화는 대곶도와 수도, 을미도에 이르는 입구역에서는 공사단계별로 흐름의 강도 변화가 발생함으로써 호안 설치로 직접적인 영향이 있음이 파악되었다. 단계별 공사중 발생하는 부유물질의 확산은 고려된 유동자료로부터 체류시간에 따른 확산 검토결과 Case 3의 경우가 Case 1, Case 2경우보다 조석 주기 증가에 따라 약간 늘어난 영역이나 전체적으로 유

사한 확산 패턴을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 공사시행으로 발생하는 SS발생시, 공사대상지역 주변 해역에 대한 영향을 저감시키기 위해 단계별 공사구간에 오탁방지막을 설치하였을 경우 최대 중심농도가 목표치 이하로 줄어드는 저감 효과를 나타내었으며, 농도 1mg/l의 확산거리의 차이가 100m 이상을 기록하였다. 이러한 영향으로 미루어 호안 공사로 발생하는 SS부하량의 저감 및 영향권의 범위를 줄이는데 오탁방지막 설치가 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(ⅰ) 대상 지역의 개발 단계별 해수유동 특성의 분석으로 공사과정과 공사완료 후의 조석 및 유동장 변화를 재현할 수 있었다.

(ⅱ) 단계적 호안 공사로 인해 반 폐쇄 수역인 만 내 제한 수역에서 유동장이 변화하여 확산과정에서도 변화된 유동장의 영향이 미치는 것을 파악할 수 있었다. 따라서, 연안역 개발에서 최종 설계안만을 분석대상으로 하지 않고 단계적인 시공계획의 평가가 필요함을 실험에 의해 입증하게 되었다.

(ⅲ) 공사로 발생하는 SS부하량을 저감시키고 영향권을 축소시키기 위한 방안으로 오탁방지막 설치는 필연적이며, 오탁방지막의 설치위치, 방향, 규모 등 오염물 확산 방지계획에 중요한 자료를 제공할 수 있을 것으로 본다.

또한, 장래에 발생하는 추가 공사와 동일한 형태의 연안역 개발시 기초적인 자료를 제시함과 동시에 연안 장래 생태계와 수질오염을 효율적으로 관리할 수 있는 근거를 확보하게 되었다. 차후 연안역 오염물의 확산분포 연구시 현장관측을 중심으로 해역의 오염물 초기농도를 반영하거나 오염물질원을 부유물질에만 국한시키지 않는 다양한 인자를 포함한 연구가 필요한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

김용과 외, 1985, "**조석에 따른 낙동강 하류 수질변화**", **한국수산학회지**, **제**18**권**, **제**2**호**, , pp. 109 118.

이정규 외, 1984, "**조류에 의한 부유사의 확산에 대한 수치모형**," **대한토목학회 논문집**, **제**4**권**, **제**4**호**.

최성룡, 1999, "**항만개발에 따른 수질변화 및 개선책에 관한 연구**, **한국항만학회지 제**13**권**, **제**1**호**, pp. 123 131.

한국수자원공사 수자원연구소, 1994, " **대하천에서의 오염물질 이송·확산 예측과 저감대책에 관한 연구**" **보고서**.

환경처, 1993, "**오염물질 이동·확산 예측기술 개발**", **보고서**(Ⅰ).

환경처, 1994, "**오염물질 이동·확산 예측기술 개발**", **보고서**(Ⅱ).

해양수산부 국립해양조사원, 1999, "99 **가덕수도 조류관측 결과**", **보고서**.

Brebbia, C. A. and Partridge, P. M., 1976, "Quadratic Finite Elements in Shallow Water Problems", J. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 102, No. 9.

Bowden, K. F., 1967, "Cirulation and Diffusion", Estuaries. G. H. Lauf (ED).

No. 83. American Association for the Advancement of Science.

Coe, J. M., Roser, D. B., 1996, "Marine Debris, Source, Impact, and Solution", Spring, NY.

Fischer, H. B., 1970, "A Method for Predicting Pollutant Transport in Tidal Waters", Hydraulic Laboratory, Univ, of Califonia, Berkeley.

Fischer, H. B., 1972, "Mass Transport Mechanisms in Partially Stratified Estuaries" J. of Fluid Mechanics. Vol. 53, Part 4.

Hansen, D. V., Rattray, Jr. M., 1965, "Gravitational Circulation in Straits and Estuaries. J. of Marine Research, Vol. 23. No. 2.

Kang, S. W., Jung ,T. S., Choi, J. K., 1986, "Circulation and Dispersion in the Nakdong river estuary", Int'l Symp. Physical Processes in Estuaries, The Netherlands.

Kang, S. W., 1988, "Numerical Modelling of Pollutant Dispersion in Masan Bay", KORDI Tech. Report, BSPF 0057-184-4.

Kang, S. W., Jung, T. S., Lee, J. C., Kim, C. S., 1989, " Circulation and Dispersion of Pollutant in Masan-Jinhae Bay", Inst. of Env. Res., Kyungnam Univ.,Vol. 11.

King, I. P., 1965, "Finite Element of Two Dimensional Time Dependent Stress Problems", Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.

Leendertes, J. J., 1967, "Aspects of a Computational Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Sea", RM 5294-PR, The Rand Corp. Santa Monica, California.

Leemdertes, J. J. and Gritton, E. C. 1971., "A Water – Quality Simulation Model for Well Mixed Estuaries and Coastal Seas", Vol. 3, Jamaica Bay Simulation, R-709-NYC, The New York City Rand Institute.

Masch, F. D. et al., 1971, "Tidal Hydrodynamic and Salinity Models for San Antonio and Matagorda Bay, Texas", Report to Texas Water Development Board, Austin, Texas.

Norton, W. R., King, I. P. and Orlob, G. T., 1973, "A Finite Element Model for Lower Granite Reservior", Walla District U.S. Army Report, prepared by Water Resources Engineers, Inc.

Orlob, G. T. et al., 1969, "Modelling of Water Quality Behavior in an Estuarial Environment", Proc. Fourth International Conference on Water Pollution Research, Prague, Czech.

Thomann, R. V., 1964, "Estuarine Water Quality Management and Forecasting", J. of ASCE, SA5.